

Návrh a realizace spirálové antény

Design and Realisation of the Spiral Antenna

Zadání bakalářské práce

Student:

Radek Fajkus

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2612R059 Mobilní technologie

Téma:

Návrh a realizace spirálové antény
Design and Realisation of the Spiral Antenna

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Spirálová anténa je specifický typ zářiče. Práce si klade za cíl popis, návrh a výrobu modelu antény na zadaném kmitočtu.

Vypracování práce bude splňovat následující body zadání:

1. Popište varianty spirálových antén a jejich specifika.
2. Realizujte praktický model antény na zadaném kmitočtu.
3. Proveďte správnost návrhu a konstrukce měřením.

Seznam doporučené odborné literatury:

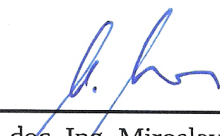
[1]BALANIS, Constantine. *Antenna Theory : Analysis and design*. 3rd edition. United States : Wiley, 2005. 1117 s. ISBN 0-471-66782-X.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

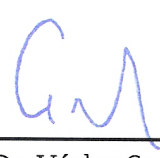
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Dvorský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 20. duben 2016

.....
podpis studenta

Rád bych poděkoval Ing. Marku Dvorskému, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou spirálových antén. Popisuje spirálovou anténu a její jednotlivé a také se zabývá konstrukcí antény a ověření její správnosti. V teoretické části popisuje, co je to anténa, jaké jsou jednotlivé druhy spirálových antén a jejich přednosti či nevýhody. V praktické části se pak zabývá návrhem a sestavením dané antény a ověřením její funkčnosti.

Klíčová slova: balun, frekvenčně nezávislá anténa, spirálová anténa, širokopásmová anténa

Abstract

This bachelor thesis deals with spiral antennas. It describes the spiral antenna and its different types and also deals with the construction of the antenna and checking its accuracy. In theoretical part it analyzes what is the antenna, what are the different types of spiral antennas and their advantages and disadvantages. In practical part it deals with the design and assembly of the antenna and verifying its functionality.

Keywords: balun, frequency independent antenna, spiral antenna, wideband antenna

Seznam použitých zkratek a symbolů

Symbol	– Popis
a	– tempo vzrůstu
c	– rychlost světla; [m/s]
D	– největší rozměr antény; [m]
dB	– Decibel
dBi	– zisk ideální izotropní antény; 0 dBi
dBd	– zisk ideálního polovlnného dipólu; 0 dBd = 2,15 dBi
f_{high}	– nejvyšší pracovní frekvence; [Hz]
f_{low}	– nejnižší pracovní frekvence; [Hz]
I_{in}	– proud na vstupních svorkách antény; [A]
L	– délka ramene spirály; [m]
N	– počet závitů
P_{rad}	– vyzářený výkon; [dB]
P_{loss}	– ztrátový výkon; [dB]
r	– poloměr ramena spirály
R_{in}	– vstupní činný odpor; [Ω]
R_{loss}	– ztrátový odpor; [Ω]
R_{max}	– vnější poloměr spirálové antény; [m]
R_{rad}	– vyzařovací odpor; [Ω]
R_0	– vnitřní poloměr spirálové antény; [m]
r_1	– poloměr blízké reaktanční oblasti; [m]
R_2	– vnější poloměr spirálové antény; [m]
s	– vzdálenost mezi závitů; jednotka: [m]
U_{in}	– napětí na vstupních svorkách; [V]
X_{in}	– vstupní jalový odpor; [Ω]
w	– šířka vodiče; [m]
Z_c	– terminálový odpor; [Ω]
Z_s	– terminálový odpor; [Ω]
DPS	– deska plošných spojů
DVB-T	– Digital Video Broadcasting – Terrestrial
GPS	– Global Positioning System
HF	– High Frequency (Krátké vlny)

ISM	– industrial, scientific and medical
LTE	– Long Term Evolution
MIMO	– multiple-input,multiple-output
PSV	– Poměr stojatých vln(Standing Wave Ratio)
RHCP	– Right Hand Circular Polarization
WiFi	– Wireless Fidelity
WiMax	– Worldwide Interoperability for Microwave Access

Řecký symbol

Popis	
δ	– rotační úhel
η	– účinnost antény; [%]
λ	– vlnová délka; [m]
λ_{high}	– nejvyšší vlnová délka, na které anténa pracuje; [m]
λ_{low}	– nejnižší vlnová délka, na které anténa pracuje; [m]
ϕ	– počáteční úhel
ψ	– úhel stoupání

Obsah

Úvod	12
1 Anténa	13
1.1 Oblasti kolem antény	13
1.1.1 Blízká reaktční oblast	13
1.1.2 Blízká zářivá oblast	13
1.1.3 Vzdálená oblast	14
1.2 Dělení antén	14
1.3 Vlastnosti antén	15
1.3.1 Vstupní impedance	15
1.3.2 Zisk antény	15
1.3.3 Účinnost antény	15
1.3.4 Poměr stojatých vln PSV	15
1.3.5 Směrovost antény	16
1.3.6 Směrová a vyzařovací charakteristika	16
1.3.7 Šířka pásma	16
1.3.8 Vstupní činitel odrazu S11	17
1.4 Širokopásmové antény	17
1.4.1 Šroubovicová anténa	17
1.4.2 Spirálová anténa	17
1.4.3 Fraktálová anténa	18
1.4.4 Logaritcko-periodická anténa	18
2 Spirálová anténa	20
2.1 Princip spirálové antény	20
2.2 Parametry spirálové antény	21
2.3 Typy spirál	22
2.3.1 Archimedova spirála	22
2.3.2 Logaritmická spirála	22
2.4 Typy spirálových antén	23
2.4.1 Planární	23
2.4.2 Kónická	25
2.4.3 Spirálová dipólová anténa	25
3 Návrh a simulace spirálové antény pro frekvenci 0,8-6 GHz	27
3.1 Návrh spirálové antény	27
3.2 Simulace spirálové antény	28
3.2.1 Optimalizace spirály	29
3.2.2 Optimalizace reflektoru	34
3.2.3 Optimalizace tubusu	35
3.2.4 Impedanční přizpůsobení	36
3.2.5 Finální simulace	39

4	Konstrukce spirálové antény a její ověření	45
4.1	Konstrukce spirálové antény	45
4.2	Ověření funkčnosti antény	48
5	Závěr	51
6	Reference	52
	Přílohy	54
A	Obsah elektronické přílohy	I
B	Spirálová anténa - simulovaný model	II
C	Spirálová anténa - simulace	V
D	Spirálová anténa - výsledky měření	VII
E	Spirálová anténa - vyrobený model	IX

Seznam obrázků

1.1	Mechanismus vyzařování elektromagnetické vlny	13
1.2	Ukázka vyzařovací charakteristiky[6] - upraveno	16
1.3	Určení šířky pásma[7] - upraveno	16
1.4	Šroubovicová anténa [11]	17
1.5	Příklady spirálové antény	18
1.6	Fraktálová anténa [18]	18
1.7	Logaritmicko-periodická anténa [22]	19
2.1	Spirálová anténa - aktivní oblast [23]	20
2.2	Archimedova spirála [26]	22
2.3	Logaritmická spirála [27]	23
2.4	Čtvercová spirálová anténa [29]	24
2.5	Archimedova spirálová anténa s dutinou [31]	24
2.6	Kónická spirálová anténa [32]	25
2.7	Spirálová dipólová anténa [33]	25
3.1	Spirálová anténa - Antenna Magus	28
3.2	Okótovaný návrh	29
3.3	Graf zpětného odrazu - Antenna Magus	29
3.4	Graf PSV - Antenna Magus	30
3.5	Graf zisku - Antenna Magus	30
3.6	Směrové charakteristiky - Antenna Magus	31
3.7	Spirála - CST Studio Suite	32
3.8	Graf zpětného odrazu - CST Studio	32
3.9	Graf PSV - CST Studio	33
3.10	Směrová charakteristika 800 MHz - CST Studio	33
3.11	Směrová charakteristika 3,4 GHz - CST Studio	34
3.12	Směrová charakteristika 6 GHz - CST Studio	34
3.13	Spirálová anténa s reflektorem - CST Studio Suite	35
3.14	Spirálová anténa s tubusem a reflektorem - CST Studio Suite	35
3.15	Grafy směrovosti	36
3.16	Mikropáskový exponenciálně zúžený balun[37]	36
3.17	Navržený balun	38
3.18	Graf zpětného odrazu - balun	38
3.19	Konečný návrh spirálové antény	39
3.20	Graf zpětného odrazu - finální	39
3.21	Graf PSV - finální	40
3.22	Grafy směrovosti 800 MHz - finální	40
3.23	Grafy směrovosti 2,4 GHz - finální	41
3.24	Grafy směrovosti 5,8 GHz - finální	41
3.25	Blízká zářivá oblast - E pole vertikálně	42
3.26	Blízká zářivá oblast - E pole zepředu	42
3.27	Blízká zářivá oblast - E pole horizontálně	43
3.28	Blízká zářivá oblast - H pole vertikálně	43

3.29	Blízká zářivá oblast - H pole zepředu	44
3.30	Blízká zářivá oblast - H pole horizontálně	44
4.1	Příprava k leptání	45
4.2	Leptání	45
4.3	Pájení	46
4.4	Úpravy	46
4.5	Finální anténa	47
4.6	Graf zpětného odrazu - analyzátor	48
4.7	Graf PSV - analyzátor	49
4.8	Ukázka měření	49
B.1	Spirálová anténa	II
B.2	Balun - přední strana	III
B.3	Balun - zadní strana	IV
C.1	Graf zpětného odrazu - simulace	V
C.2	Poměr stojatých vln PSV - simulace	VI
D.1	Graf zpětného odrazu - měření	VII
D.2	Poměr stojatých vln PSV - měření	VIII
E.1	Okótovaná spirála	IX
E.2	Okótovaný návrh reflektoru a tubusu	X
E.3	Spirálová anténa - přední strana	XI
E.4	Spirálová anténa - zadní strana	XII

Úvod

Anténa je jedním z důležitých komunikačních prvků. Pomocí ní jsme schopni používat bezdrátovou komunikaci. Antény přitom mohou nabývat mnoha tvarů a jsou různě velké v závislosti na vlnové délce, pro kterou je anténa určena.

Tato práce se zabývá spirálovou anténou a jejími jednotlivými typy. Rozhodně to není jedna z používanějších antén, ovšem její předností je velká šířka pásma a také frekvenční nezávislost jejích parametrů.

Druhá kapitola práce shrnuje základní informace o anténě, jejich dělení a shrneme si její parametry. Také uvádí typy širokopásmových antén.

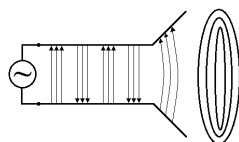
Třetí kapitola rozebírá samotnou spirálovou anténu, její návrhové parametry, typy spirál, které se používají a nakonec uvádí typy samotných spirálových antén.

Čtvrtá kapitola se zabývá návrhem dané antény pro určitý kmitočet, což znamená vypočítat důležité parametry antény, její navržení v příslušném softwaru a její simulaci.

Poslední část práce se zaměřuje především na konstrukci antény a ověření její funkčnosti a správnosti.

1 Anténa

Anténa je prvek, který na vysílací straně umožňuje změnu šíření harmonického elektromagnetické vlny podél vf napaječe na změnu šíření v obecném prostoru a u přijímací strany naopak. Jednoduše můžeme anténu označit jako zařízení pro příjem a vyzařování rádiových vln.



Obrázek 1.1: Mechanismus vyzařování elektromagnetické vlny

Co se týče samotného mechanismu vyzáření elektromagnetické vlny, můžeme jej vysvětlit následovně. Na obrázku 1.1 můžeme vidět zdroj harmonického napětí, který mezi dvěma vodiči vytváří elektrické pole. Pohyb elektronů ve vodičích navíc způsobí proud, jenž v prostoru mezi vodiči vytváří magnetické pole. Shluky siločar pak v čase putují směrem od zdroje do volného prostoru. Po vyzáření tohoto pole siločáry utvoří uzavřenou smyčku bez náboje. [1]

1.1 Oblasti kolem antény

Existují tři základní typy oblastí, které anténu obklopují. Vyskytují se v různých vzdálenostech od antény.

1.1.1 Blízká reaktční oblast

Také je nazývána jako Rayleighova oblast. Je to oblast, která obklopuje anténu, jenž se nachází v jejím středu. V této oblasti elektromagnetické pole ještě nemá charakter elektromagnetické vlny a jalový výkon je větší než činný. Oblast je maximálně velká do vzdálenosti:

$$r_1 = 0,62 \cdot \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \text{ [m]} \quad (1.1)$$

Kde λ je vlnová délka a D představuje největší rozměr antény.[1][2]

1.1.2 Blízká zářivá oblast

Taktéž známá jako Fresnelova oblast. Jedná se o mezioblast mezi blízkou reaktční a vzdálenou oblastí. Vzorec pro výpočet vnějšího poloměru oblasti:

$$r_2 = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} \text{ [m]} \quad (1.2)$$

Kde D je větší než λ . [1][2]

1.1.3 Vzdálená oblast

Můžeme ji znát také pod názvem Fraunhoferova oblast. Tato oblast tvoří veškerý prostor, který začíná na hranici r_2 a pokračuje až do nekonečna. Pole v této oblasti je příčné a obě složky jsou kolmé na směr šíření. Z toho důvodu je v této oblasti přenášen pouze činný výkon. [1][2]

1.2 Dělení antén

Antény můžeme klasifikovat do více skupin. Prakticky lze antény rozdělit na vysílací a na přijímací. Vysílací zajišťuje přeměnu vlnění podél vedení na vlnění ve volném prostoru. Přijímací provádí to samé, jen opačně. Na vysílací anténu se kladou větší nároky. V principu však každá anténa může vysílat a přijímat. Existuje však více možností, jak rozdělit antény.

Dle tvaru zářiče můžeme dělit antény:

- liniové
- smyčkové
- dielektrické
- spirálové, šroubovicové

Dle šířky pracovního pásma

- širokopásmové
- úzkopásmové

Dle polarizace

- lineární(horizontální nebo vertikální)
- kruhové
- eliptické

Dle tvaru vyzařovací charakteristiky

- všesměrové
- více směrové
- směrové [1]

1.3 Vlastnosti antén

1.3.1 Vstupní impedance

Vstupní impedance antény je poměrem napětí a proudu na vstupních svorkách. Je to důležitý parametr pro správné navržení vazebních obvodů a pro správné impedační přizpůsobení. Pokud impedančně nepřizpůsobíme anténu, budou vznikat odrazy, což se podepíše na zvýšeném PSV (Poměr stojatých vln) a také činnosti antény. Všechny impedance by se tedy měly shodovat. Vstupní impedance lze vyjádřit jako poměr fázorů vstupního napětí a proudu:

$$Z_{in} = \frac{U_{in}}{I_{in}} = R_{in} + jX_{in} \quad [\Omega] \quad (1.3)$$

Kde U_{in} a I_{in} jsou napětí a proud na vstupních svorkách, R_{in} je vstupní činný odpor a X_{in} je vstupní reaktance antény, kterou se snažíme co nejvíc snížit.

Vstupní činný odpor se skládá ze dvou složek a to, ze ztrátového odporu a vyzařovacího odporu.

Ztrátový odpor – je dán vlastní vodivostí materiálu, ze kterého je anténa vyrobena

Vyzařovací odpor – je to odpor, který klade anténa elektromagnetické vlně při vyzařování. [1][3][4]

1.3.2 Zisk antény

Zisk je charakterizován jako poměr intenzity vyzařování U v daném směru vůči celkovému vstupnímu výkonu P_{in} vyzářeného izotropickou (referenční) anténou děleném 4π . Jednotkou je decibel.

Dle použitého zářiče rozlišujeme další varianty této jednotky.

Pokud je jako referenční zářič použita izotropická anténa, potom použijeme jednotku dBi. Pokud se však jedná o půlvlnný dipól, potom se jedná o dBd. [1][4][5]

1.3.3 Účinnost antény

Účinnost antény se vyjádříme jako poměr vyzářeného výkonu a výkonu přivedeného na anténu. Čím je účinnost vyšší, tím je anténa schopna lépe vyzářit vstupní výkon. [3]

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{loss}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.4)$$

1.3.4 Poměr stojatých vln PSV

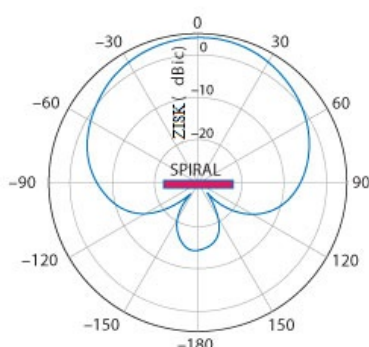
Poměr stojatých vln PSV je prakticky ukazatel toho, jak dobře je anténa impedančně přizpůsobena. Impedance antény a napájení musí být dobře přizpůsobeny, jinak budou na vedení vznikat odrazy, což vede ke vzniku stojatých vln. Riskujeme tak zničení vysílače. Ideální hodnota PSV je 1 : 1, která značí, že anténa je ideálně přizpůsobená. Proto se v praxi snažíme co nejlépe přiblížit k této hodnotě. [1]

1.3.5 Směrnost antény

Jde o schopnost antény soustředit její vyzařování do určitého směru nebo přijmout záření z určitého směru. Mezi směrovostí a ziskem existuje tedy vztah, který nám říká, že v určitém směru je signál silnější a tudíž i zisk. [4]

1.3.6 Směrová a vyzařovací charakteristika

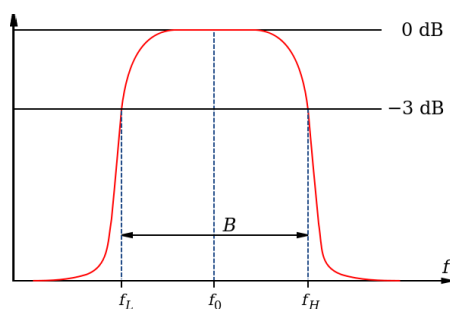
Jedná se o jednu a tu samou charakteristiku. Rozdíl je v tom, že směrová se vztahuje k přijímací anténě a vyzařovací k vysílací anténě. Popisuje směrové vlastnosti antén. Tato charakteristika je definována jako matematická funkce nebo grafické vyjádření vyzařovacích vlastností antény v prostoru. [1]



Obrázek 1.2: Ukázka vyzařovací charakteristiky[6] - upraveno

1.3.7 Šířka pásma

Šířka pásma udává rozsah pracovních frekvencí, na kterém anténa operuje. Spousta parametrů antény je závislá na frekvenci, a proto záleží na šířce pásma. Určuje se jako pokles o -3 dB vůči maximální hodnotě. [1]



Obrázek 1.3: Určení šířky pásma[7] - upraveno

1.3.8 Vstupní činitel odrazu S11

Vstupní činitel odrazu S11 udává, jak dobře je anténa přizpůsobená. Uvádí se ve formě útlumu odrazu v dB nebo také jako bezrozměrná veličina. Jako u bezrozměrné veličiny ρ je ideální hodnota 0, což znamená, že zpětná odražená vlna bude nulová a veškerá energie tak byla vyzářena, popřípadě spotřebovaná ztrátami. Činitel odrazu je tedy třeba mít co nejnižší. Vztah mezi S11 v dB a činitelem odrazu ρ . [8]

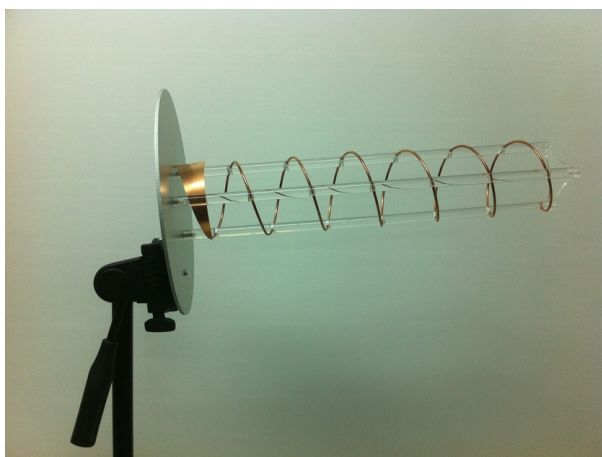
$$\rho = 10^{\frac{S11}{20}} \quad (1.5)$$

1.4 Širokopásmové antény

Širokopásmové antény jsou schopné pracovat na velkém rozsahu kmitočtů, zpravidla dokáží obsáhnout i více kmitočtových pásem. Existuje několik základních druhů, které si nyní představíme.

1.4.1 Šroubovicová anténa

Šroubovicová anténa je charakteristická vodičem, jenž je zatočen do šroubovice. Pro lepší funkci obsahuje i reflektor. Tato anténa generuje kruhovou polarizaci a to buď levotočivou či pravotočivou (dle směru vinutí závitů). Čím více šroubovice má závitů, tím lepší je zisk této antény. Mezi její hlavní klady patří směrovost a poměrně jednoduchá konstrukce. Její nevýhodou je nutnost impedančního transformátoru pro napájecí kabel. Použití antény nachází v radiotelemetrii. [9][10]

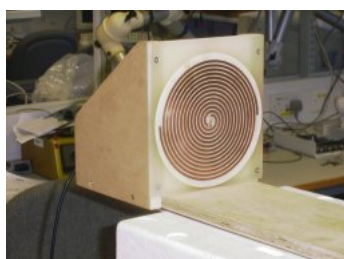


Obrázek 1.4: Šroubovicová anténa [11]

1.4.2 Spirálová anténa

Spirálová anténa je širokopásmová, kruhově polarizovaná anténa, jejíž dvě ramena (vodiče) jsou zatočena do spirály. Můžeme se setkat se dvěma typy antény a to s plošnou varian-

tou a s kuželovou variantou. Kuželová varianta má oproti plošné lepší zisk, neboť na rozdíl od ní je směrová. Nevýhodou spirálových antén spočívá v obtížnějším napájení. Použití nachází ve vojenství a letectví. [12][13]



(a) Plošná[14]

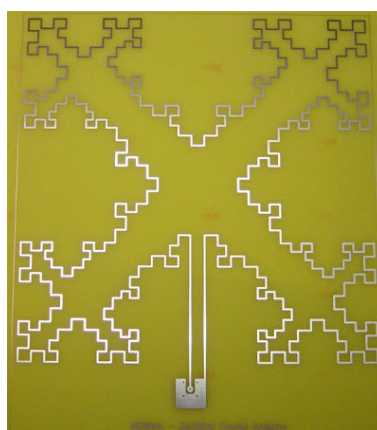


(b) Kónická[15]

Obrázek 1.5: Příklady spirálové antény

1.4.3 Fraktálová anténa

Tyto širokopásmové antény řadíme mezi plošné. Jsou charakteristické tím, že navzdory své malé velikosti antény dokáží pracovat nad širokým frekvenčním pásmem. Efektivně také dokáží využít prostoru pomocí fraktálů (což jsou geometrické tvary, které se periodicky opakují). Mezi nevýhody bychom mohli zahrnout komplexitu struktury a ztrátu zisku. Přesto díky svým výhodám je anténa používána ve vojenské sféře či pro mobilní zařízení. [16][17]

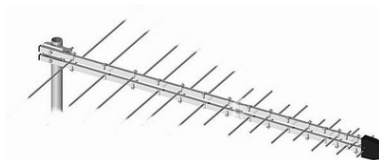


Obrázek 1.6: Fraktálová anténa [18]

1.4.4 Logaritcko-periodická anténa

Logaritcko-periodická anténa je velmi širokopásmová, směrová anténa. Anténa je složena z dipólových prvků. Délka prvky a vzdálenost mezi nimi se logaritmicky zvětšuje

od předního elementu po poslední. Výhodou této antény je její snadná upravitelnost a její impedanční přizpůsobení se blíží ideálnímu. Její nevýhoda spočívá v poměrně malém zisku vzhledem k rozměrům. Používá se k příjmu DVB-T(Digital Video Broadcasting – Terrestrial). [19] [20] [21]



Obrázek 1.7: Logaritmicko-periodická anténa [22]

2 Spirálová anténa

V roce 1953 se Edwin Turner začal zabírat dipólovými anténami. Místo toho, aby nechal její ramena rovná, zatočil je do spirály.

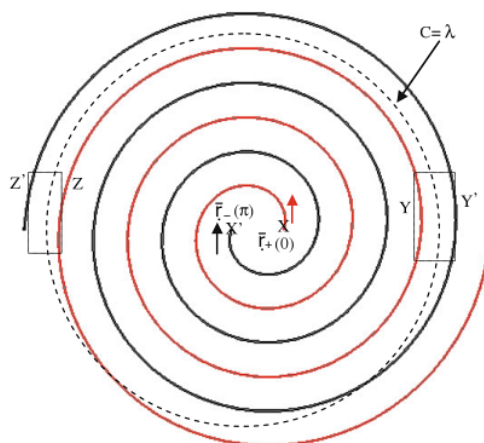
Spirálová anténa patří mezi frekvenčně nezávislé antény. Patří mezi širokopásmové antény s postupnou vlnou. Procentní šířka pásma může být vysoká až 30:1, což znamená, že pokud je nejnižší frekvenční hranicí 1 GHz, spirálová anténa bude pořád efektivní i při frekvenci 30 GHz včetně frekvencí v tomto rozsahu. Aktivním prvkem jsou dva vodiče stočené do spirály v rovině nebo na kuželové ploše. [12]

Spirálové antény jsou obvykle kruhově polarizovány. Vyzařovací diagram spirálové antény má většinou vrchol záření v kolmém směru vůči rovinně spirály.

Spirálové antény se obvykle používají pro vojenské účely, kdy samotné antény slouží ke snímání povrchu a průzkumu. Nezabírají totiž mnoho místa. Také jsou využívány ve vojenském letectví v pásmu širokém od 1 GHz až do 18 GHz. Nacházejí využití také v jiných aplikacích včetně GPS(Global Position System), kde je výhodné mít tzv. RHCP(Right Hand Circular Polarization) antény. [12]

2.1 Princip spirálové antény

Princip činnosti spirálové antény může být vysvětlen na základě takzvané pásmové teorie(Radiating Ring Theory). Uvažujme tedy spirálovou anténu se dvěma ramenama. Teorie říká, že taková anténa bude vyzařovat v aktivní oblasti, kde se obvod spirály přibližně rovná vlnové délce. V této oblasti v sousedících ramenech spirály protékají proudy, které jsou spolu ve fázi, což vede ke vyzařování signálu. Pro každou frekvenci existuje oblast, ve které proudy v ramenech spirály produkují záření. Toto záření však odebírá z ramen energii a proto proud se zvyšující se vzdáleností dále slábne.



Obrázek 2.1: Spirálová anténa - aktivní oblast [23]

Na obrázku 2.1 můžeme vidět aktivní oblast vyznačenou čárkovanou čarou. V bodech X a X' se nachází napájení. V bodech Y a Y' se pak proudy dostávají do fáze a dochází tak k vyzáření. V bodech Z a Z' stále ještě dochází k záření, ovšem proud vlivem odebírané energie z vodičů slábnou.

Mimo tuto oblast proudy spolu již nejsou ve fázi a tak se vyzařované pole chová destruktivně. Proud nevyzářené vlny proteče kolem aktivní oblasti dál. Pokud to pak velikost spirály dovolí, vyzáří se ve oblasti se správnou fází. To nastane tehdy, kdy se obvod rovná třem vlnovým délkám.

Jestliže spirála není dostatečně velká, proudy dosáhnou konce ramen spirály a buď jsou absorbovány nebo se odrazí zpět ke středu spirály. Aby se zabránilo odrazu, používá se na koncích ramen odporová zátěž. [23]

2.2 Parametry spirálové antény

Existuje několik parametrů, které ovlivňují vyzařování spirálové antény. Zahrnujeme mezi ně:

Vnější radius - R_{max} - Určuje nejnižší frekvenci spirálové antény, na které je schopna pracovat. Nejnižší pracovní frekvence nastane tehdy, když je vlnová délka rovna obvodu spirálové antény. [12] Spočítat se dá jako:

$$f_{low} = \frac{c}{\lambda_{low}} = \frac{c}{2\pi R_{max}} \text{ [Hz]} \quad (2.1)$$

Tempo vzrůstu - a - Je to konstanta, která udává, jak anténa roste s úhlem. Pokud je příliš velká, mezera mezi ramena spirály bude malá a tak budou ramena příliš natěsnány na sebe. V tomto případě se bude chovat spíše jako kondenzátor kvůli těsně stočenému vodiči, díky čemuž bude mít špatné vyzařovací vlastnosti. Pokud naopak bude konstanta příliš malá, bude se anténa chovat spíše jako dipól, neboť vzdálenost mezi závitů bude velká. [12]

Struktura napájení - Napájení musí být řešeno pomocí balunu (symetrizačního členu), aby každé rameno mělo stejný proud. Samotná struktura napájení má vliv na určení nejvyššího pracovního kmitočtu. To, jak moc se ramena spirály natěsnají na sebe, určuje, jak malá vlnová délka může být zachycena a zároveň bude anténa stále schopna práce. K nejvyšší pracovní frekvenci dochází ve chvíli, kdy vnitřní poloměr je roven $\frac{\lambda}{4}$, tedy jedné čtvrtině vlnové délky. Z toho vyplývá, že nejvyšší frekvenci lze odvodit z vnitřního poloměru. [12]

$$f_{high} = \frac{c}{\lambda_{high}} = \frac{c}{4R_0} \text{ [Hz]} \quad (2.2)$$

Další geometrické parametry - Jedním z prvních parametrů je počet závitů N . Důležitým je i mezera mezi jednotlivými závitů - s . Také můžeme pokládat šířku vodiče za jeden z návrhových parametrů. [24]

2.3 Typy spirál

Spirálové antény můžeme rozdělit na dva typy. Prvním je Archimedova spirála a druhým je logaritmická spirála.

2.3.1 Archimedova spirála

Prvně se objevila, když v roce 1953 Turner navrhl spirálu, jenž měla plochá, poměrně úzká kovová ramena. Byla napájena symetricky ve středu spirály a vyznačovala se kruhovou polarizací, jenž se projevovala na každé straně roviny spirály. [25]

Archimedova spirála je rovinná křivka, jejíž poloměr roste lineárně s velikostí úhlu. Každé rameno u Archimedovy spirály je definováno vztahem:

$$r = a\phi \text{ [m]} \quad (2.3)$$

Tato rovnice nám neříká nic jiného, než že poloměr r roste lineárně s úhlem ϕ . Parametr a nám pak udává poměr, při kterém spirála roste. Pro druhé rameno platí ten samý vztah, pouze je otočeno u 180 stupňů. [12]

Délka ramene však může být velká, což může způsobit na nízkých kmitočtech vysoké ztráty. Úhel stoupání Archimedovy spirály je ve středu největší, kdežto na okraji je nejmenší. Díky tomu je ve středu větší poměr vodivého materiálu, což způsobuje více módů na vyšších frekvencích. Na okraji, kde je poměr menší, nastává zlepšení na nízkých frekvencích. [24]



Obrázek 2.2: Archimedova spirála [26]

Archimedova spirála je vždy kruhově polarizována, je levotočivá nebo pravotočivá. Také má poměrně konstantní vstupní impedanci a vyzařovací diagram napříč frekvenčním rozsahem, nad kterým pracuje. Výhodou je stabilita fázového středu a lepší axiální poměr. [24][26]

2.3.2 Logaritmická spirála

V roce 1954, kdy se utvářela teorie, že anténa, která by byla popsána úhly, má vlastnosti frekvenčně nezávislé, V.H. Rumsey navrhl, že nekonečně dlouhá struktura založená

na rovnoúhlé nebo-li logaritmické spirále by mohla být jednoznačně popsána z hlediska úhlů. Ve svých studiích se pak zaměřil na konečnou strukturu takové spirály. Jeho následný výzkum vyvážené plošné antény, jenž byla popsána vlastnostmi rovnoúhlé spirálové antény, prokázal, že tato anténa v praktické velikosti má vlastnosti frekvenčně nezávislé. [25]

Logaritmické spirálové antény, též známé jako rovnoúhlé spirálové antény, mají každé rameno definováno vztahem:

$$r = R_0 e^{a\phi} \text{ [m]} \quad (2.4)$$

R_0 je konstanta, která udává počáteční poloměr spirálové antény (představuje oblast napájení). Parametr a udává tempo vzrůstu. Rovnice pak říká, že čím více má spirálová anténa závitů ramen, tím její poloměr exponenciálně roste. [12]



Obrázek 2.3: Logaritmická spirála [27]

Rovnoúhlá spirálová anténa tedy může být popsána úhly. Tím splňuje všechny požadavky na tvar, který může být použitý k navržení frekvenčně nezávislé antény. Je nutné specifikovat délku ramena spirály, neboť povrch křivky by se jinak mohl teoreticky šířit do nekonečna. Nejnižší pracovní frekvence se vyskytne tehdy, když se celková délka ramene rovná vlnové délce. [28]

Charakteristickou vlastností této spirály je, že spojnice pólu spirály a libovolného jejího bodu protne spirálu vždy pod stejným úhlem. Výhodou tohoto druhu jsou nižší ztráty a vlastní komplementární struktura.

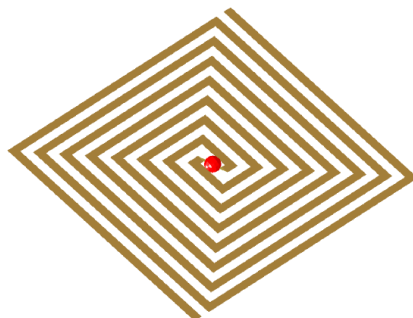
2.4 Typy spirálových antén

2.4.1 Planární

Jakožto planární mohou být použity oba typy spirál uvedené v předchozí podkapitole. U planární spirálové antény je vyzářovací diagram dvousměrný.

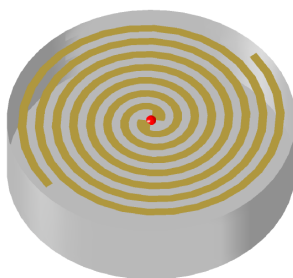
Kromě uvedených spirál lze ještě jako planární anténu vidět *čtvercovou spirálovou anténu*. Jedná se o širokopásmovou, kruhově polarizovanou anténu, jejíž vlastnosti jsou srovnatelné s Archimedovou spirálou. Pro její konstrukci jsou důležité parametry jako

hustota spirálového vinutí, tloušťka substrátu a jeho relativní permitivita a délka ramene. Její výhoda spočívá v jednoduchosti konstrukce této spirály. Další výhoda, kromě jednoduchosti návrhu, spočívá v tom, že máme-li pouze určitý prostor(zejména čtvercový), čtvercová spirála jej dokáže efektivně využít. To se však děje za cenu většího nerovnoměrného výkonu na velké šířky pásma. Konce ramen mívají zátěž kvůli pohlcení odrazů při malých frekvencích. Uplatnění nachází ve vojenství. [29][30]



Obrázek 2.4: Čtvercová spirálová anténa [29]

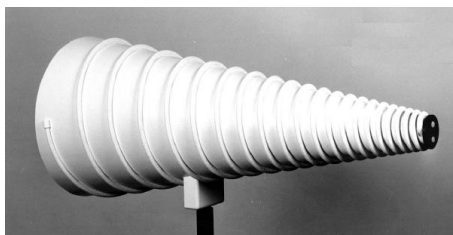
Jedním z dalších typů planárních spirálových antén je *Štěrbínová spirálová anténa*. Tento typ má pod spirálou navíc umístěnou dutinu, která izoluje spirálu od toho, co je za ní. Smyslem dutiny je zajistit jednosměrné záření. K vytvoření takové dutiny postačí obyčejná kovová podložka, jenž je od spirály oddělena nějakou vzdáleností či hloubkou. Nevýhodou takové kovové podložky je fakt, že způsobuje nežádoucí odrazy vyzařovaného pole, které vstupuje do dutiny. To má za následek rušení záření, což nepříznivě ovlivňuje širokopásmové vlastnosti antény. Z tohoto důvodu je dobré využít absorpčního materiálu, který je schopen pohltit odražené pole, díky čemuž nedochází k rušení a anténa si tak zachová širokopásmové vlastnosti. [12]



Obrázek 2.5: Archimedova spirálová anténa s dutinou [31]

2.4.2 Kónická

Kónická spirálová anténa je charakteristická tvarem kužele, na nějž je navinutá spirála. Mohou být aplikovány oba typy spirál. Má spoustu žádoucích vlastností. Hodí se především tam, kde je potřeba kruhově polarizované směrové antény. Vzhledem k jejich ceně a kompaktnosti se hodí pro mobilní a letecké aplikace.



Obrázek 2.6: Kónická spirálová anténa [32]

Mezi její výhody patří větší zisk, větší šířka pásma a také rozšiřuje spirálovou anténu o další rozměr. Taktéž je možno anténu uzemnit přímo v podstavě kužele. Kónické antény jsou jednosměrové s maximem na vrcholu kužele. I přes velké šířky pásma kruhová polarizace a relativně konstantní vstupní impedance zůstává zachována. [28][1]

Vodivý povrch kuželové spirály může být zkonstruován za pomoci použití techniky k vytváření plošných spojů, čímž vyleptáme na dielektrickém kuželu (který slouží jako nosič) ramena spirály. Napájení můžeme připojit přímo k ramenům, která jsou na kuželu. Symetrie může být zajištěna pomocí stejných opatření jako u planární spirály. [28]

2.4.3 Spirálová dipólová anténa

Spirálová dipólová anténa je jednoduchá variace dipólové antény. Dipólová anténa obsahuje na konci svých ramen spirálové elementy, které generují všesměrově levou nebo pravou kruhovou polarizaci. Smysl polarizace závisí na orientaci spirál. Anténa tak může mít polarizaci horizontální i vertikální.



Obrázek 2.7: Spirálová dipólová anténa [33]

Výhodou této antény je pak její poměr velikosti vůči vyzářenému výkonu, neboť anténa se řadí k fyzicky malým anténám. Díky přidaným spirálovým elementům však navzdory tomu zvyšuje svou účinnost. Anténa je schopna pracovat v HF(High Frequency) pásmu. Je vhodná také k použití v MIMO(multiple-input, multiple-output) systémech. [34][35]

3 Návrh a simulace spirálové antény pro frekvenci 0,8-6 GHz

Třetí kapitola se zabývá návrhem a simulací spirálové antény. Mým úkolem je zkonstruovat anténu pro pásmo 800 MHz až 6 GHz. Toto pásmo pokrývá pásma ultrakrátkých vln a superkrátkých vln. Vyrobená anténa tedy bude schopna pracovat s technologiemi LTE(Long Term Evolution), Wi-Fi(Wireless Fidelity), WiMax(Worldwide Interoperability for Microwave Access), GPS, případně Bluetooth, ZigBee a další.

3.1 Návrh spirálové antény

V této kapitole se budeme zabývat návrhem dvouramenné logaritmické spirálové antény. Spirála se tedy bude skládat ze dvou identických ramen, které budou vůči sobě otočeny o 180 stupňů. Rameno logaritmické spirály je definováno následujícími rovnicemi:

$$r_1 = R_0 \cdot e^{a \cdot \phi} \quad (3.1)$$

$$r_2 = R_0 \cdot e^{a \cdot (\phi - \delta)} \quad (3.2)$$

kde R_0 je vnitřní poloměr, a je tempo vzrůstu, ϕ je počáteční úhel, který udává společně s vnitřním poloměrem, odkud rameno roste. Vztahuje se k ose x. V našem případě nabývá dvou hodnot a to 0 a π . δ je rotační úhel, který je definován jako $\frac{n}{180^\circ}$, kde n je počet ramen, což v našem případě značí dvě ramena. Z toho vyplývá, že úhel δ se rovná $\frac{\pi}{2}$. Druhé rameno spirály získáme jednoduše otočením prvního ramene o 180 stupňů.

Parametr a jakožto tempo vzrůstu ovlivňuje úhel stoupání ψ , který definujeme jako:

$$\tan \psi = \frac{1}{a} \quad (3.3)$$

Vnitřní poloměr R_0 je ovlivňován horní frekvencí a hodnota toho poloměru by se měla pohybovat v rozmezí $\frac{\lambda}{16} \leq R_0 \leq \frac{\lambda}{8}$. Vnější poloměr R_{max} lze odvodit ze vztahu pro výpočet délky ramene spirály:

$$L = (R_{max} - R_0) \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{a^2}} \quad (3.4)$$

Samotná délka ramene je pak rovna vlnové délce, která je vztažena k nižší frekvenci. Při $\delta = \frac{\pi}{2}$ je anténa samokomplementární a dle Babinetova principu by spirálová anténa pro nekonečnou délku měla mít odpor $Z_s = Z_c = 188,5 \Omega \simeq 60\pi$. Ve skutečnosti bývá pak odpor menší. [36]

Výpočet parametrů antény

Minimální vlnová délka

$$\lambda_{low} = \frac{c}{f_{high}} = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^9} = 0,05 \text{ m} = 50 \text{ mm} \quad (3.5)$$

Vnitřní poloměr:

$$\frac{\lambda_{low}}{16} \leq R_0 \leq \frac{\lambda_{low}}{8} \quad (3.6)$$

$$3,125 \text{ mm} \leq R_0 \leq 6,25 \text{ mm} \quad (3.7)$$

Zvolil jsem poloměr $R_0 = 4,5 \text{ mm}$.

Maximální vlnová délka

$$\lambda_{high} = \frac{c}{f_{low}} = \frac{3 \cdot 10^8}{0,8 \cdot 10^9} = 0,375 \text{ m} = 375 \text{ mm} \quad (3.8)$$

Vnější poloměr:

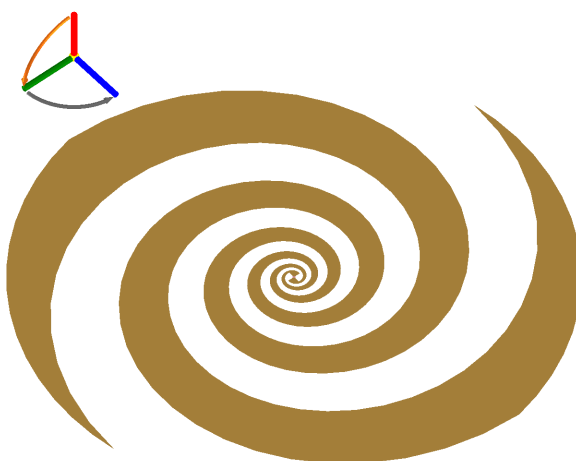
$$R_{max} = \frac{L}{\sqrt{1 + \frac{1}{a^2}}} + R_0 = \frac{0,375}{\sqrt{1 + \frac{1}{0,221^2}}} + 0,0045 = 0,085 \text{ m} = 85 \text{ mm} \quad (3.9)$$

Tempo vzrůstu:

$$a = 0,221 \quad (3.10)$$

Úhel stoupání:

$$\psi = \arctg \frac{1}{a} = \arctg \frac{1}{0,221} = \arctg 4,545 = 77,59^\circ \quad (3.11)$$

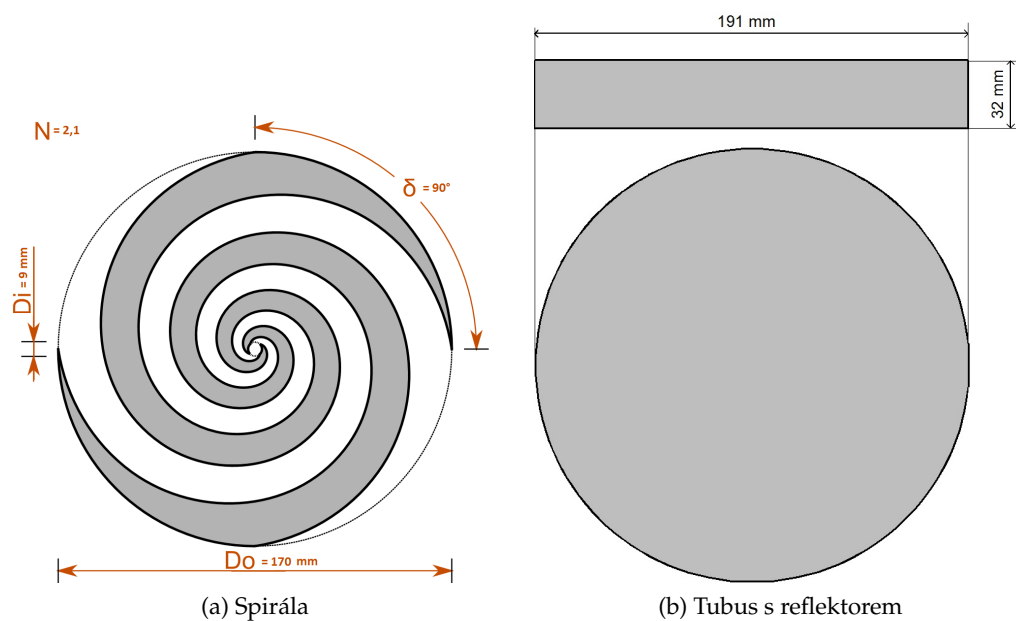


Obrázek 3.1: Spirálová anténa - Antenna Magus

3.2 Simulace spirálové antény

Pro simulaci spirálové antény byly použity programy Antenna Magus a CST Studio. Prvotní návrh proběhl v programu Antenna Magus.

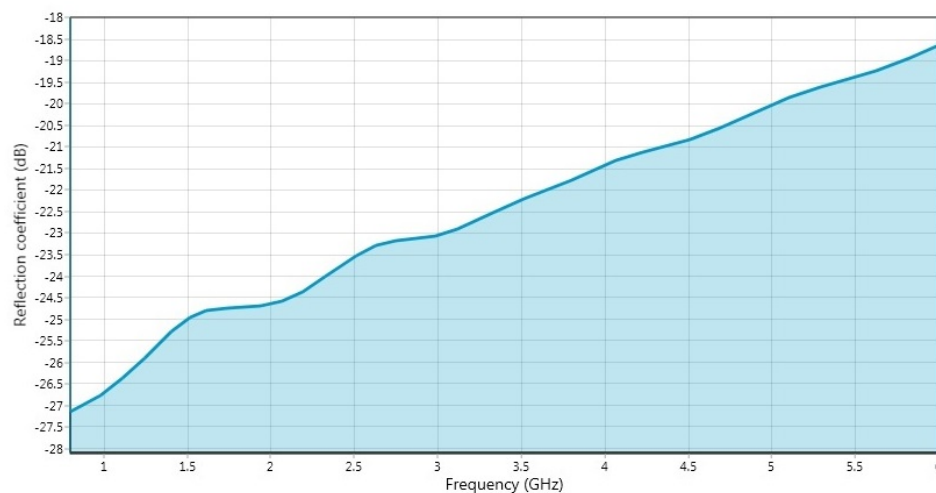
Jedná se o jednoduchý nástroj, jenž obsahuje mnoho již připravených šablon, které lze využít. Prakticky to znamená urychlení návržení daného typu antény včetně výsledků simulace. Následný návrh lze vyexportovat a dále s ním pracovat v CST Studio Suite.



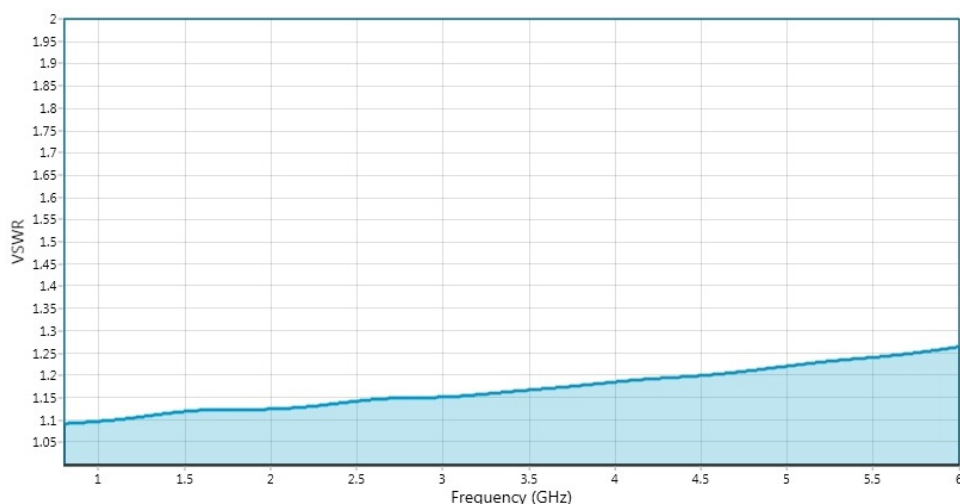
Obrázek 3.2: Okótovaný návrh

3.2.1 Optimalizace spirály

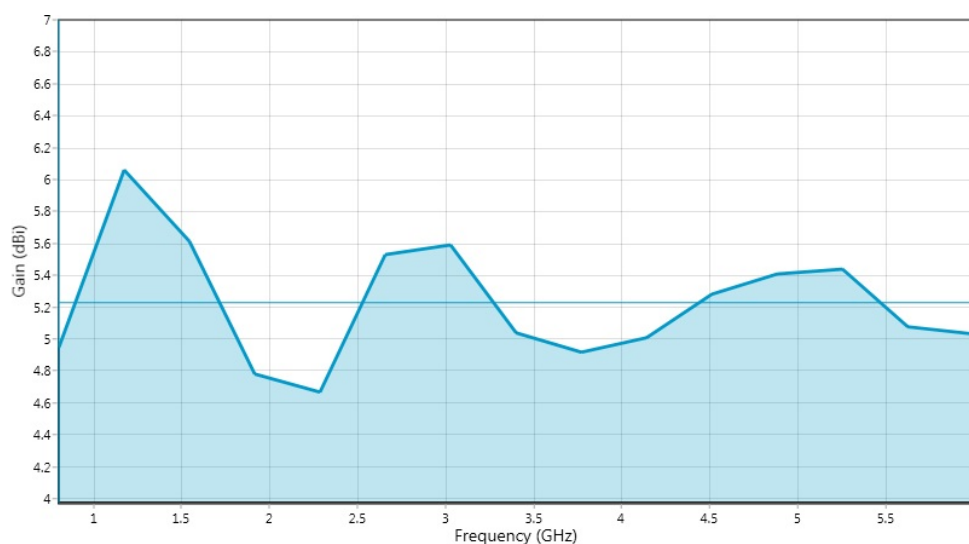
Pro návrh a simulaci jsem použil šablonu logaritmické spirálové antény, kde stačí zadat frekvenční pásmo a polarizaci spirály (zda se jedná o pravotočivou či levotočivou). Výsledný návrh se spočte sám.



Obrázek 3.3: Graf zpětného odrazu - Antenna Magus



Obrázek 3.4: Graf PSV - Antenna Magus



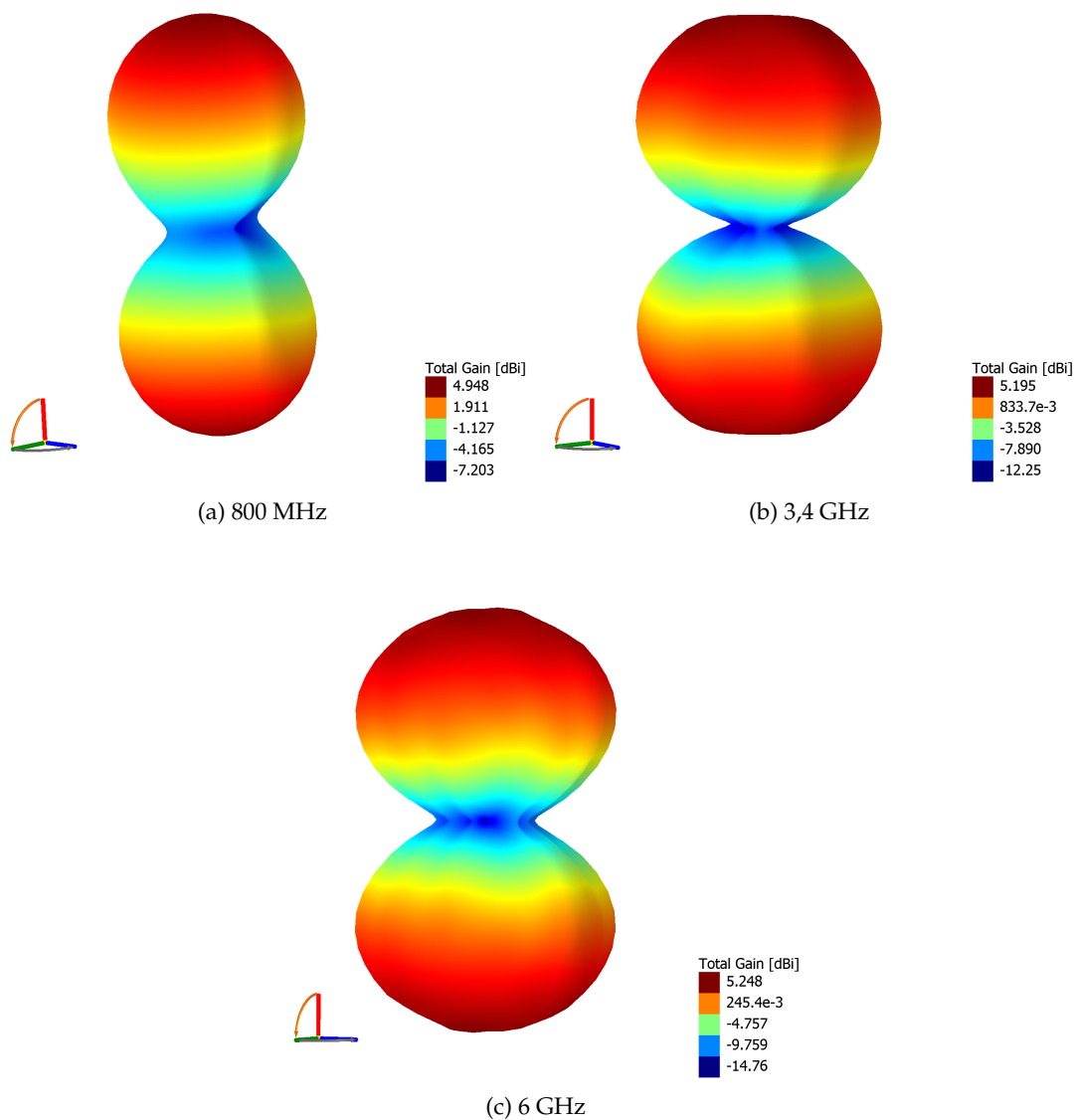
Obrázek 3.5: Graf zisku - Antenna Magus

Výsledek je normován na 188Ω , což je impedance antény ve volném prostoru. Vnitřní průměr spirálové antény byl spočten na 8,7 mm, vnější průměr na 357,5 mm a počet závitů je 2,7.

Na grafech zpětného odrazu (3.3), PSV (3.4) a zisk antény (3.5) při daných parametrech. Nejnižší hodnota zpětného odrazu je při 800 MHz, kdy hodnota nabývá -27,15 dB. Posléze má průběh vzestupnou tendenci. Hodnota, kterou chceme dosáhnout, je -10 dB a na grafu 3.3 vidíme, že podmínku anténa splňuje v celém pásmu.

Ideální hodnota PSV je 1 : 1. V praxi je snaha se co nejvíce přiblížit k této hodnotě. Na grafu 3.4 vidíme, že se průběh pohybuje mezi 1,1 : 1 až 1,26 : 1.

Na grafu zisku antény 3.5 je spočtena průměrná hodnota zisku, což činí 5,25 dBi.



Obrázek 3.6: Směrové charakteristiky - Antenna Magus

Na grafech 3.6 vidíme směrovou charakteristiku pro dolní kmitočet, horní kmitočet i pro frekvenci 3,4 GHz. Z grafů je patrné, že navržená spirálová anténa je dvousměrová, tvar charakteristik je kompaktní a velikost hlavních laloků na všech grafech se pohybuje okolo 5 dBi.

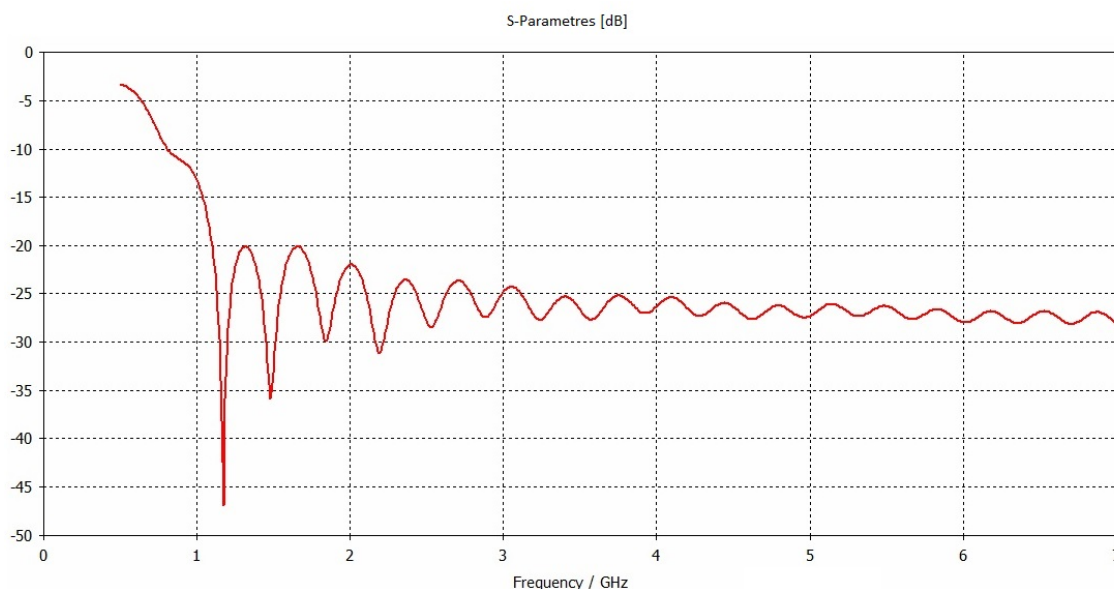


Obrázek 3.7: Spirála - CST Studio Suite

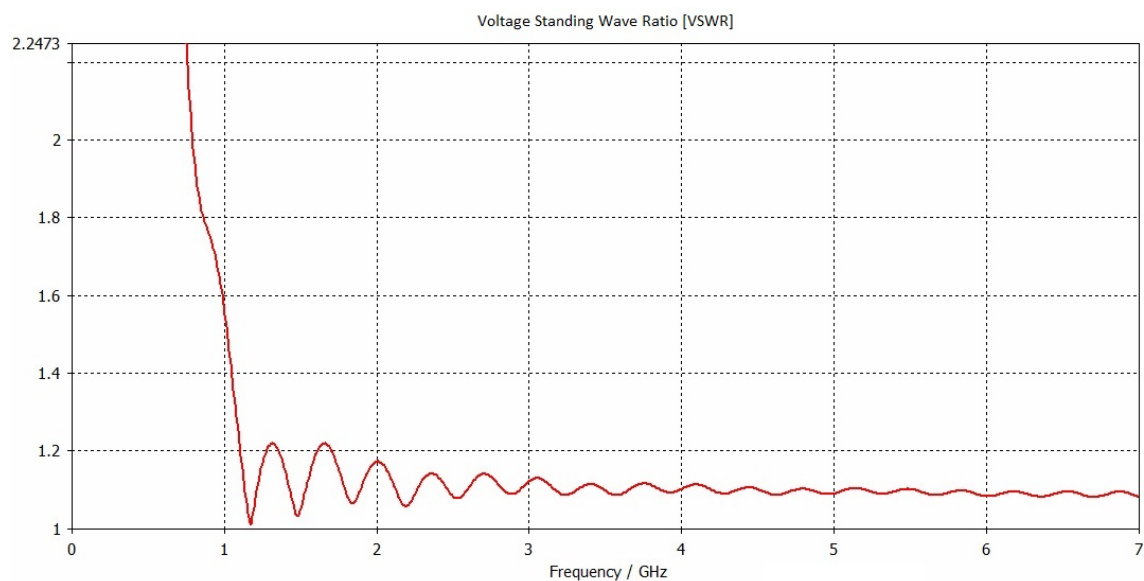
Výsledný návrh programu v Antenna Magus se však neshodoval s mými výpočty, avšak simulace v CST Studio Suite prokázala správnost mých výpočtů. Při zmenšení vnějších a vnitřních průměrů antény bylo také třeba změnit i počet závitů spirály. K testování jsem použil 1,5, 2,1 a 3 závitů, přičemž u 2,1 závitů se prokázaly lepší vlastnosti navrhované spirály. Zpětný odraz S11, jak můžeme vidět na grafu 3.8 se pohybuje okolo -25 dB, přičemž maximální hodnota je -47 dB.

PSV, jak je vidět na grafu 3.9, je sice při 800 MHz 1,8 : 1, avšak po zbytek pásma se hodnota PSV pohybuje okolo 1,1 : 1.

Zisk antény se pohybuje okolo 5,2 dBi, stejně jako v případě návrhu z Antenna Magus. Tyto hodnoty se však vztahují k anténě ve volném prostoru.

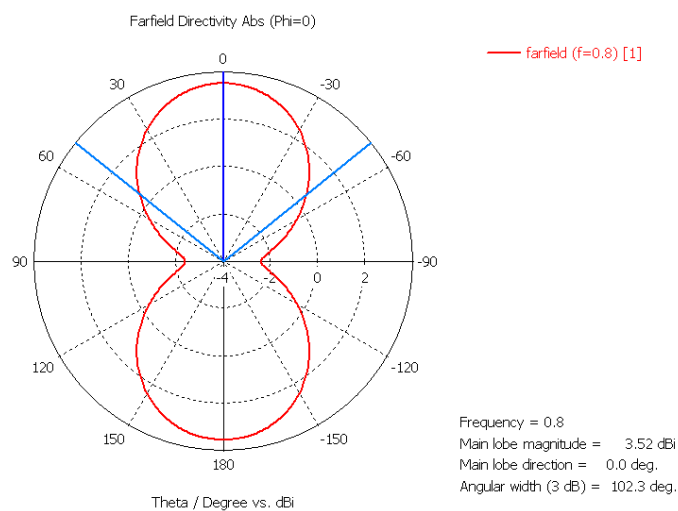


Obrázek 3.8: Graf zpětného odrazu - CST Studio

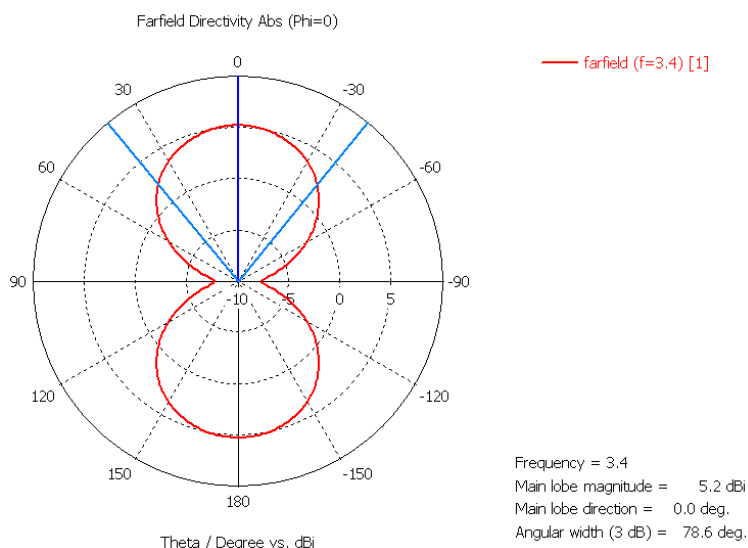


Obrázek 3.9: Graf PSV - CST Studio

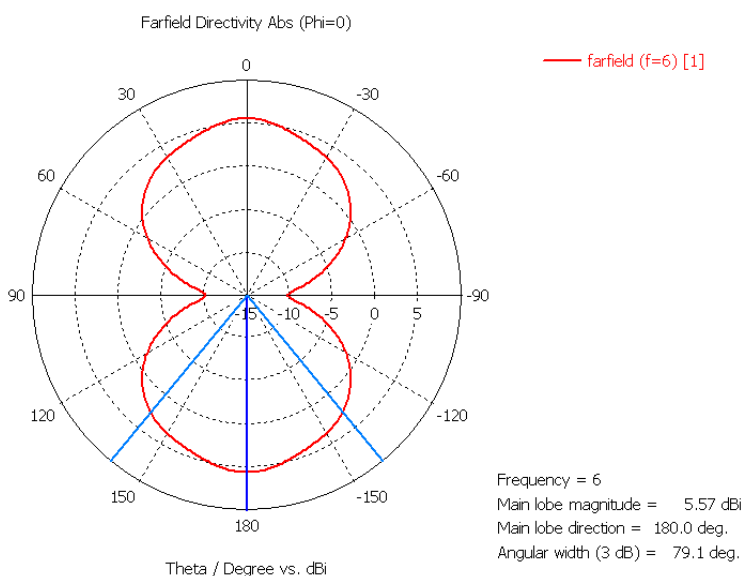
Směrové charakteristiky na grafech 3.10, 3.11 a 3.12 jsou rovněž dvousměrové, kompaktní a krom směrové charakteristiky pro 800 MHz, kde je velikost hlavního laloku 3,52 dBi, mají velikost hlavního laloku nad 5 dBi. Konkrétně pro 3,4 GHz je to 5,2 dBi a pro 6 GHz je to 5,57 dBi.



Obrázek 3.10: Směrová charakteristika 800 MHz - CST Studio



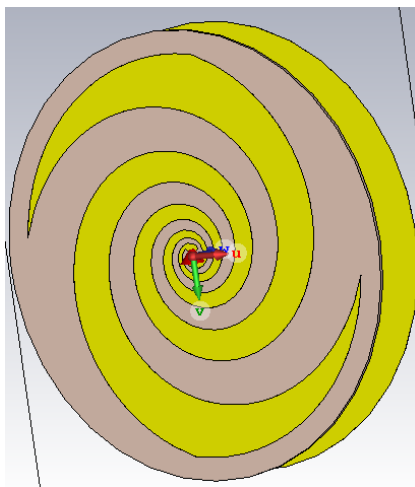
Obrázek 3.11: Směrová charakteristika 3,4 GHz - CST Studio



Obrázek 3.12: Směrová charakteristika 6 GHz - CST Studio

3.2.2 Optimalizace reflektoru

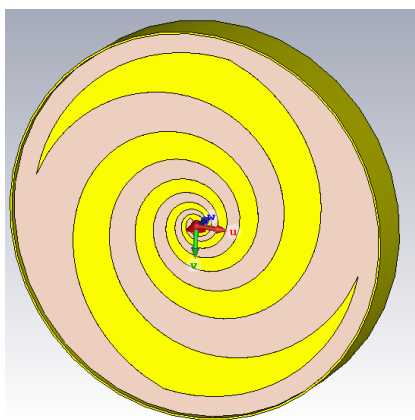
Pro simulaci skutečné antény byl použit cuprexit FR-4 s tloušťkou vrstvy mědi $35 \mu\text{m}$. Pro usměrnění spirálové antény, která je obvykle dvousměrová, byl vymodelován reflektor z mědi, který se umísťuje do vzdálenosti maximálně $0,25\lambda$, přičemž λ je střední kmitočet. Lze rovněž najít antény, které mají reflektor umístěný blíže ke spirále. Nejprve jsme reflektor umístili do vzdálenosti 35 mm od spirály, což odpovídá $0,25\lambda$. Po postup-



Obrázek 3.13: Spirálová anténa s reflektorem - CST Studio Suite

ném snižování reflektoru bylo rozhodnuto o umístění reflektoru do vzdálenosti $0,2\lambda$, kde charakteristika vykazovala nejlepší vlastnosti. To činí 27 mm od plochy spirály.

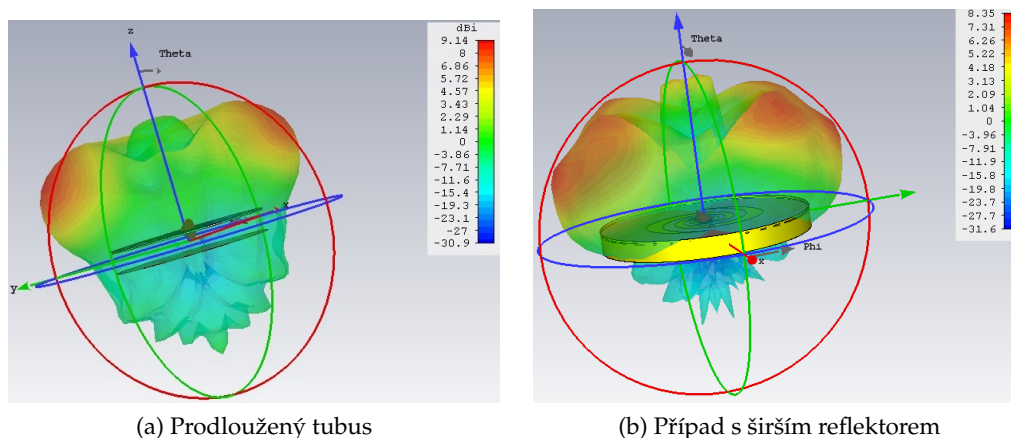
3.2.3 Optimalizace tubusu



Obrázek 3.14: Spirálová anténa s tubusem a reflektorem - CST Studio Suite

Nejprve bylo uvažováno, že se spirála společně s reflektorem umístí do PVC tuby, avšak směrová charakteristika byla stále značně zborcená. Z tohoto důvodu i tubus byl namodelován z měděného materiálu a společně s reflektorem pak vytváří dutinu pod spirálou. Tubus je vysoký 32 mm a společně s reflektorem mají průměr 191 mm.

Mimojiné byl také odsimulován případ, kdy by tubus byl delší o například o 20 mm. Cílem bylo dosáhnout kompaktnějšího hlavního laloku při vyšších kmitočtech, avšak výsledek se příliš nelišil od původního návrhu. Jiný případ pak zahrnoval zvětšení prů-

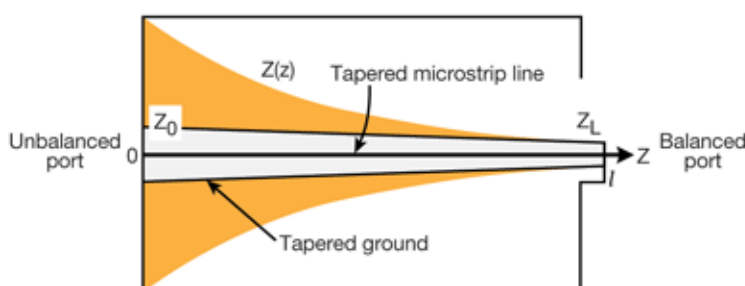


Obrázek 3.15: Grafy směrovosti

měru reflektoru i roury na 300 mm. Simulace však ukázala, že čím větší je průměr, tím více se hlavní lalok na vyšších frekvencích bortí.

Z těchto důvodů jsme zůstali u původního návrhu. Nyní však bylo třeba vyřešit impedanční přizpůsobení a rovněž symetrizační přizpůsobení. K tomu se u spirálových antén využívá balun.

3.2.4 Impedanční přizpůsobení



Obrázek 3.16: Mikropáskový exponenciálně zúžený balun[37]

Balun zahrnuje v sobě obě požadovaná přizpůsobení. Co se týče impedančního přizpůsobení, musíme vzít na vědomí, že spirálová anténa je širokopásmová. Z tohoto důvodu musíme použít vhodný transformátor. Nejznámější typy takových transformátorů jsou kaskádový čtyřvltný, binomický, trojúhelníkový, exponenciální nebo Klopfensteinův transformátor.[38]

Každý z těchto transformátorů pracuje dobře na určité délce, která je závislá na hodnotě středního kmitočtu. Kupříkladu trojúhelníkový transformátor by měl být dlouhý λ .

Vzhledem vzdálenosti reflektoru od spirály, jenž činí 27 mm, bylo nutné se za myslet, který z těchto typů bude nejlepší použít.

Exponenciální transformátor by měl dosahovat délky $\frac{\lambda}{2}$. Tato délka transformátoru nám nevyhovuje, avšak za určitých podmínek lze transformátor zmenšit. Čím menší je rozdíl mezi přizpůsobovanými impedancemi, tím více je možno transformátor zmenšit. Abych u spirálové antény dosáhl impedančního přizpůsobení, bylo třeba převést 50Ω (impedance SMA konektoru) na 80Ω (impedance antény). Rozdíl mezi impedancemi není tak velký a proto je možno balun zmenšit. [37]

Ze vzorců níže můžeme získat velikost impedance v závislosti na délce transformátoru:

$$a = \frac{1}{L} \cdot \ln\left(\frac{Z_L}{Z_S}\right) \quad (3.12)$$

$$Z(l) = Z_S \cdot e^{a \cdot l} \quad 0 \leq l \leq L \quad (3.13)$$

Abychom pak dosáhli symetrizace, použijeme mikropáskový zúžený balun. Na jedné straně balunu bude nesymetrické páskové vedení. To se skládá ze substrátu o výšce h , relativní permitivitě ϵ_r , dvou pásků z obou stran substrátu o výšce t . Nesymetrie spočívá v tom, že spodní nebo také zemní plocha může být nekonečně široká, ale stačí, pokud je třikrát širší než šířka horního pásku.

Na druhé straně balunu pak bude symetrické páskové vedení, kde šířka pásku na horní i spodní straně je stejná. Nyní je nutné ovšem spočítat šířku horního pásku. [38] Pro takové vedení platí:

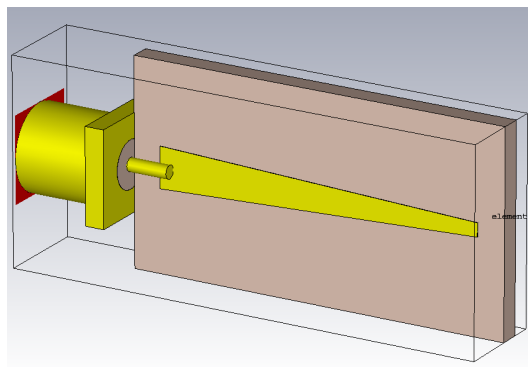
$$\frac{w}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad (3.14)$$

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} (0.23 + \frac{w}{h}) \quad (3.15)$$

Snažíme se vypočítat poměr šířky w ku výšce h . Z výše uvedených vzorců vyplývá, že šířka pásku je závislá na relativní permitivitě ϵ_r . Po dosazení do vzorců nám vychází, že pro materiál FR-4 s relativní permitivitou $\epsilon_r = 4,5$ je šířka $w = 3 \text{ mm}$ pro impedanci $Z_0 = 50 \Omega$. Pro $Z_0 = 80 \Omega$ je šířka $w = 1,138 \text{ mm}$. Z tohoto vyplývá, že čím širší je plocha pásku, tím menší je odpor. Výška substrátu je $h = 1,5 \text{ mm}$.

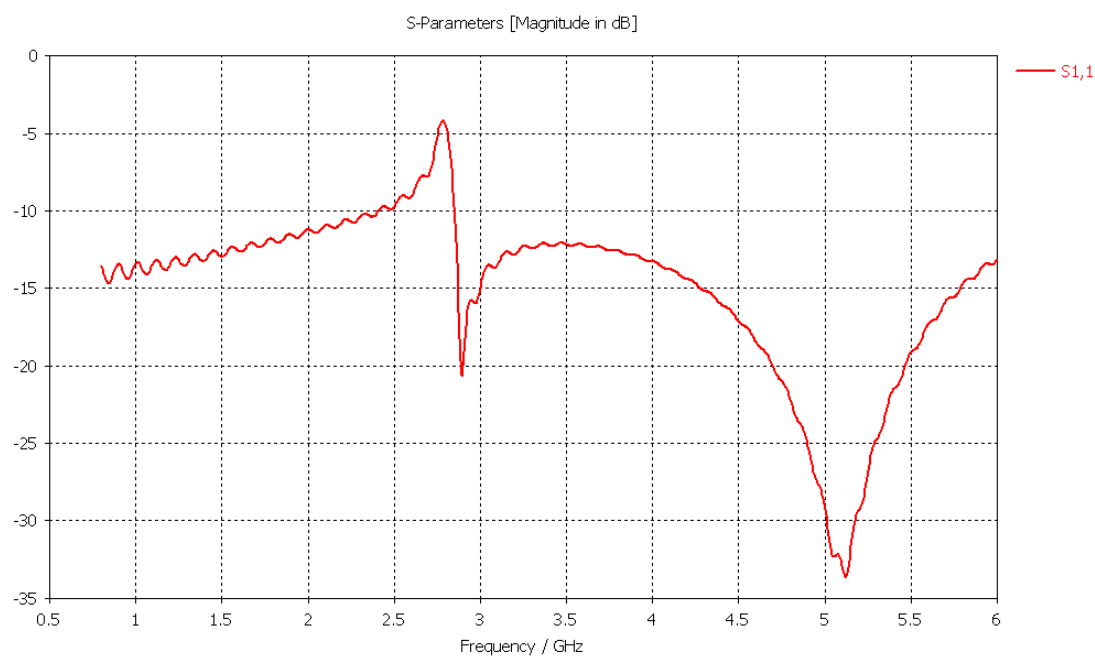
Nyní, když byly vypočteny parametry pro balun, jsme mohli přejít k samotnému modelování. Nejprve byl navržena horní pásek, jenž se postupně zužuje lineárně. Následně byl na druhé straně vymodelován spodní pásek, který byl na symetrické straně široký 15 mm, čímž byl pětikrát širší než šířka horního pásku. Zvolení větší šířky souvisí s tím, že je třeba také započítat šířku konektoru.

Pro úplnost otestování balunu byl nasimulován také SMA konektor o vnitřním průměru 1 mm a vnějším průměru 3,5 mm. Při první simulaci se projevil vliv stínění vedení koaxiálního kabelu na průběh zpětného odrazu, neboť samotné stínění bylo blízko hornímu pásku, na kterém byl připojen vnitřní vodič koaxiálního kabelu. Bylo nutné tedy



Obrázek 3.17: Navržený balun

zkrátit vrchní pásek o 2 mm, aby se zvětšila vzdálenost od stínění. Zlepšení se dostavilo ihned.

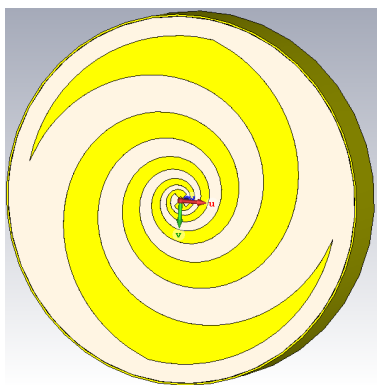


Obrázek 3.18: Graf zpětného odrazu - balun

Z konstrukčních důvodů byl také zkrácen celý návrh na 26 mm, abychom mohli balun společně s konektorem vložit do dutiny za spirálu. Dle grafu zpětného odrazu 3.18 je patrné, že na většině pásma nevznikají velké odrazy.

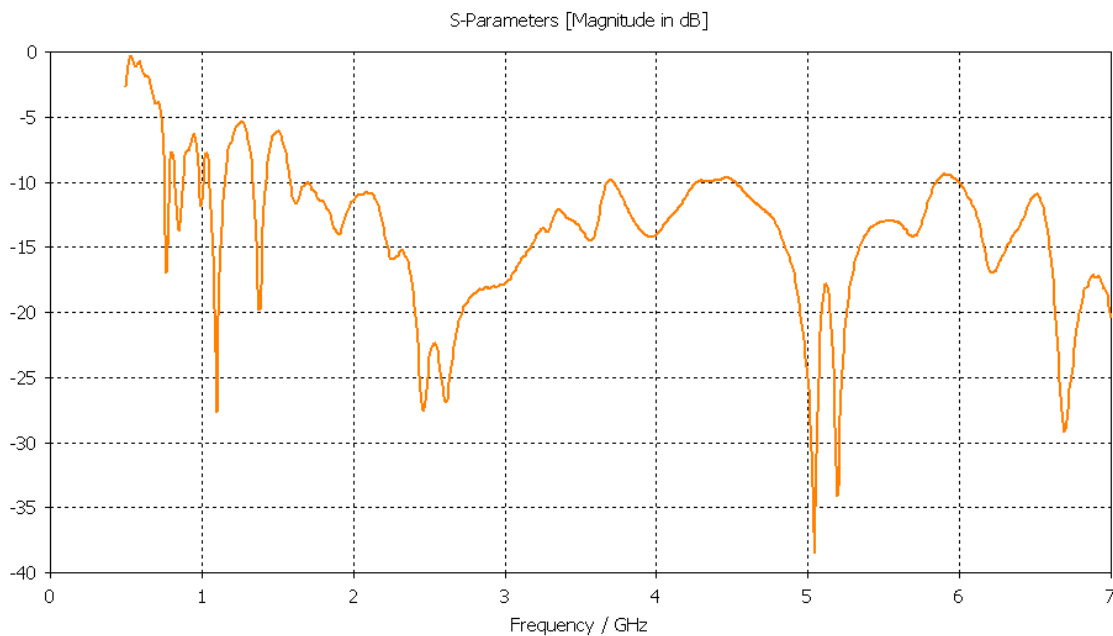
3.2.5 Finální simulace

V konečném důsledku byl zakomponován balun do návrhu spirálové antény. Bylo ještě nutné posunout reflektor na 28,5 mm, aby se balun vlezl do prostoru za spirálovou anténou. Stínění je rovněž připojeno k měděnému tubusu a reflektoru, čímž bylo také provedeno uzemnění.



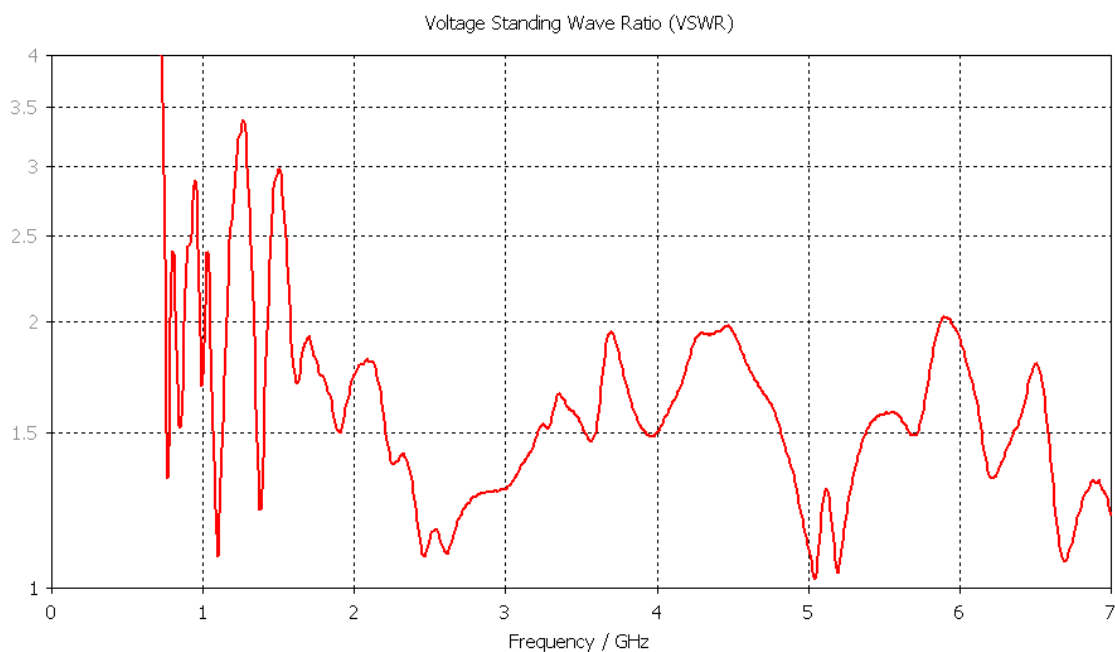
Obrázek 3.19: Konečný návrh spirálové antény

Na grafu zpětného odrazu 3.20 vidíme, že průběh v pásmu od 800 MHz do 1,6 GHz kolísá okolo -10 dB. Po zbytek pásma se průběh stabilizuje a pohybuje se mezi -10 dB a -15 dB.

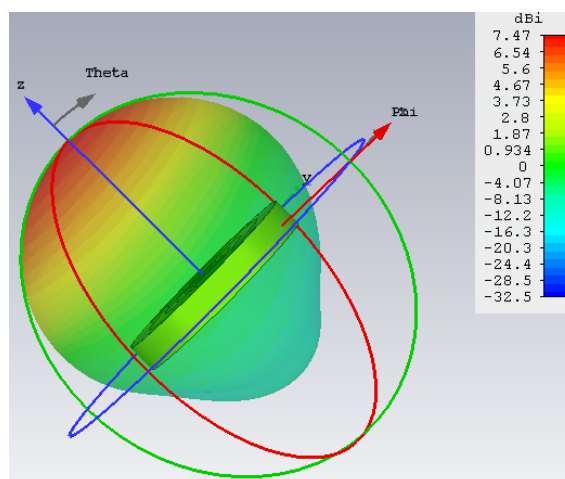


Obrázek 3.20: Graf zpětného odrazu - finální

Na grafu poměru stojatých vln 3.21 můžeme vidět, že hodnota PSV v počátečním, již uvedeném úseku, rovněž není stabilní (maximální hodnota 3,4 : 1), nakonec však se průběh stabilizuje a nepřekročí hodnotu 2 : 1. Na průběh může mít v této části vliv samotný balun, který by mohl být příliš krátký.



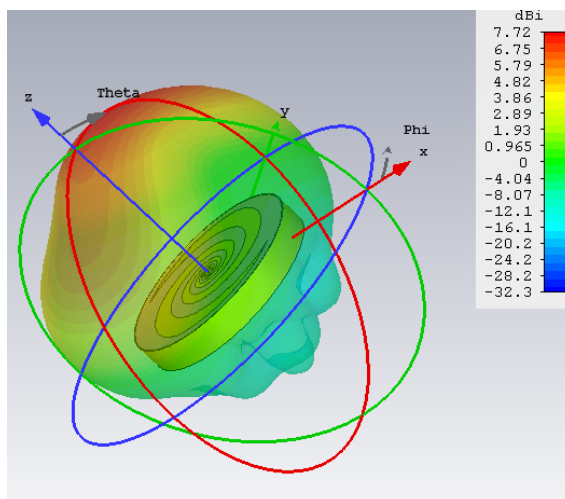
Obrázek 3.21: Graf PSV - finální



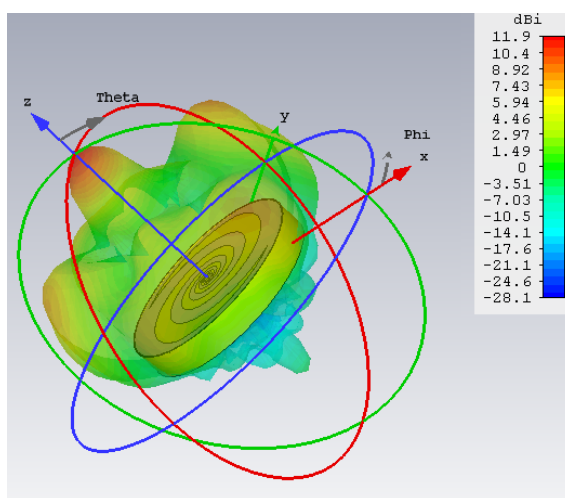
Obrázek 3.22: Grafy směrovosti 800 MHz - finální

Grafy směrovosti 3.22, 3.23, 3.24 vykazují poměrně dobrou charakteristiku. Na frek-

vencích 800 MHz a 2,4 GHz je tvar charakteristik kompaktní a nebortí se. Na vyšší frekvenci 5,8 GHz se podařilo dosáhnout zlepšení hlavního laloku a omezení vlivu vedlejších laloků.

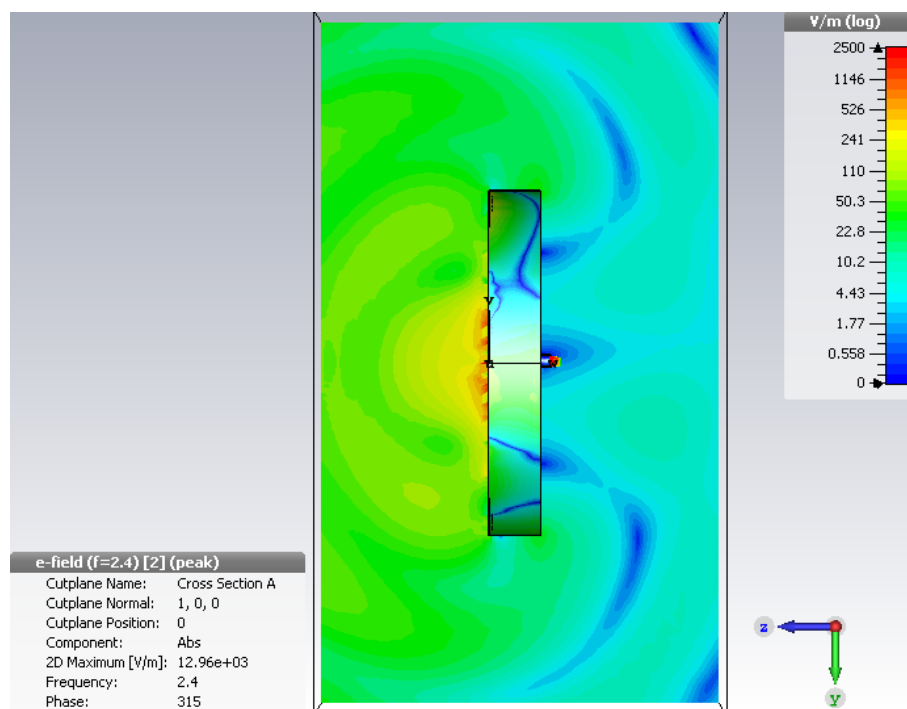


Obrázek 3.23: Grafy směrovosti 2,4 GHz - finální

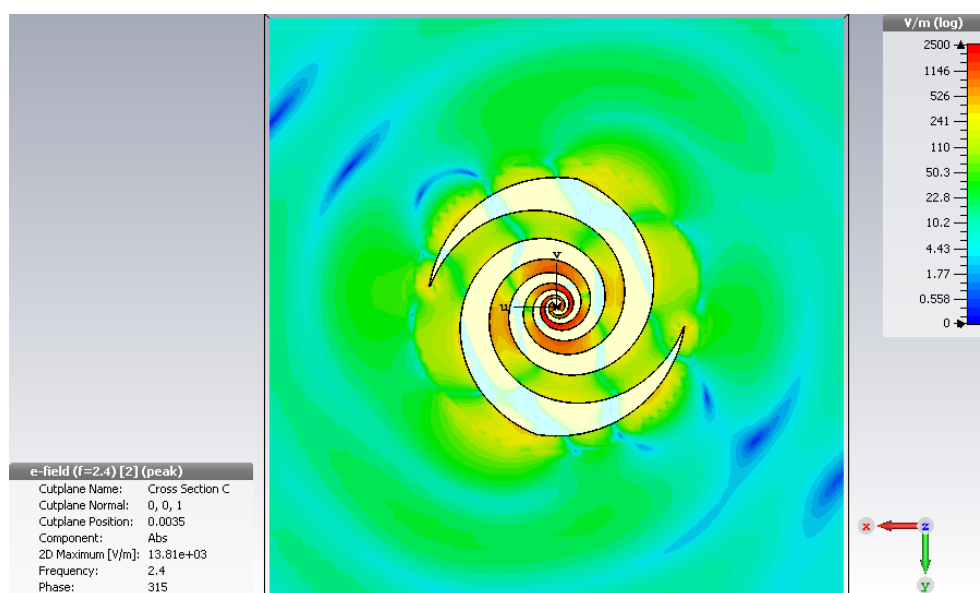


Obrázek 3.24: Grafy směrovosti 5,8 GHz - finální

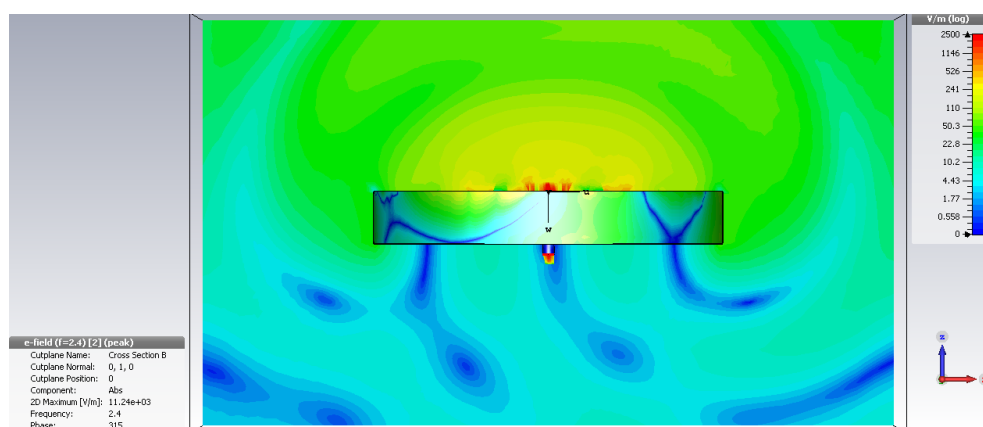
Na grafech 3.25, 3.26, 3.27, 3.28, 3.29 3.30 na stranách 42, 43 a 44 vidíme odsimulované elektromagnetické pole blízké zářivé oblasti. Obě složky, jak E pole, tak H pole, jsou zobrazeny zvlášť ze tří pohledů.



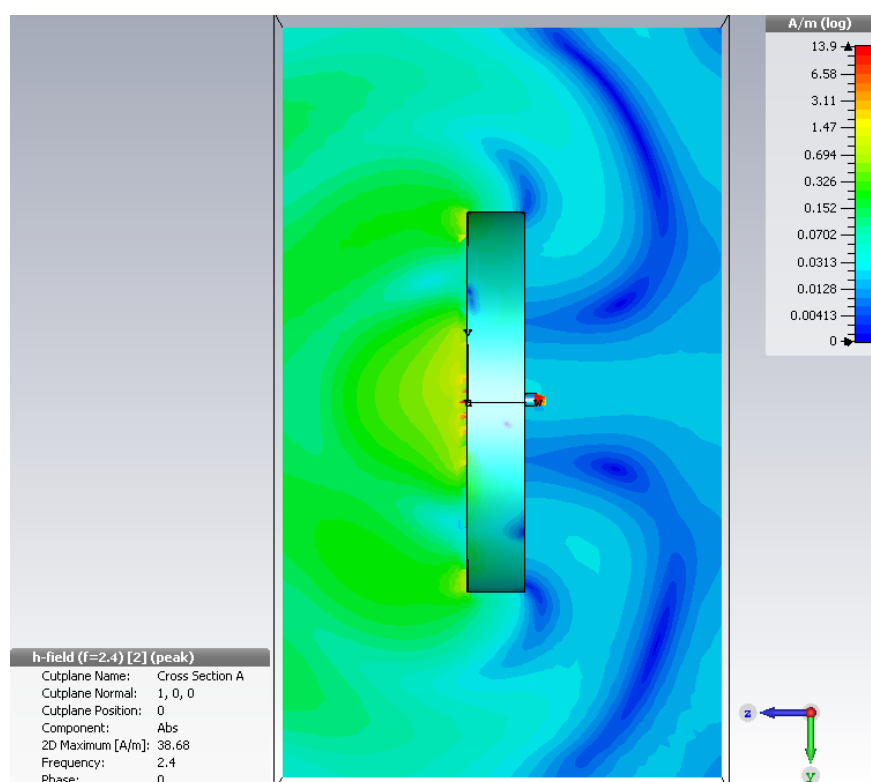
Obrázek 3.25: Blízká zářivá oblast - E pole vertikálně



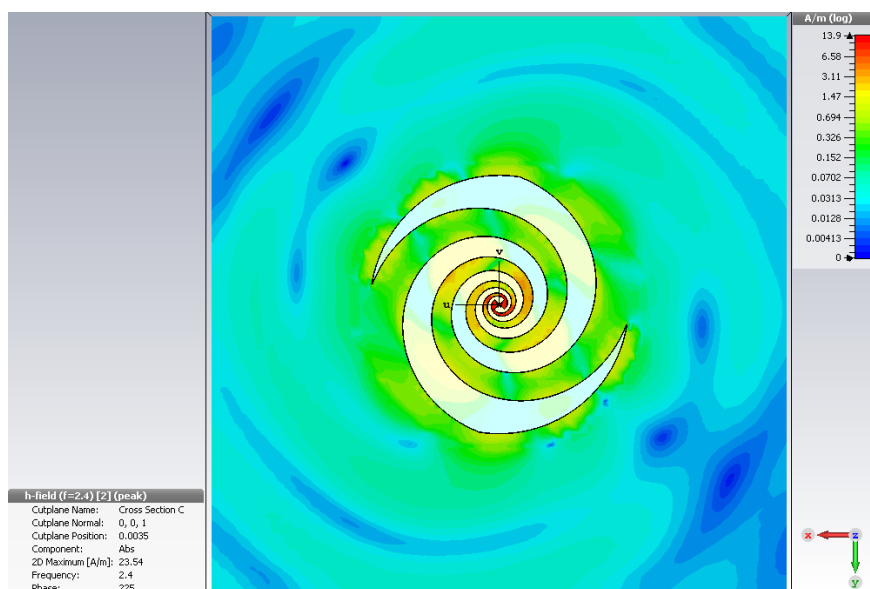
Obrázek 3.26: Blízká zářivá oblast - E pole zepředu



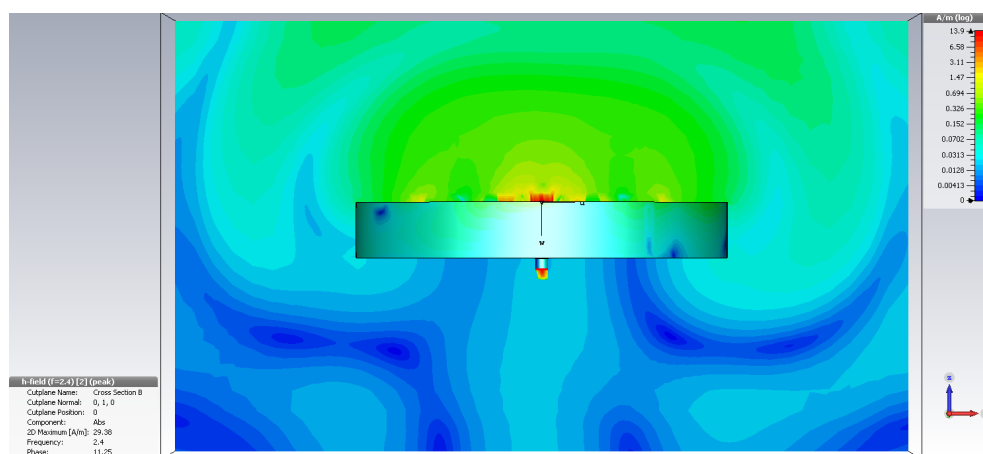
Obrázek 3.27: Blízka zářivá oblast - E pole horizontálně



Obrázek 3.28: Blízka zářivá oblast - H pole vertikálně



Obrázek 3.29: Blízká zářivá oblast - H pole zepředu



Obrázek 3.30: Blízká zářivá oblast - H pole horizontálně

4 Konstrukce spirálové antény a její ověření

4.1 Konstrukce spirálové antény

Už ze simulací je patrné, že ke konstrukci bylo potřeba jedna jednostranná DPS (deska plošných spojů), jedna oboustranná DPS, jeden SMA konektor a tubus s reflektorem z měděného plechu.



(a) Balun

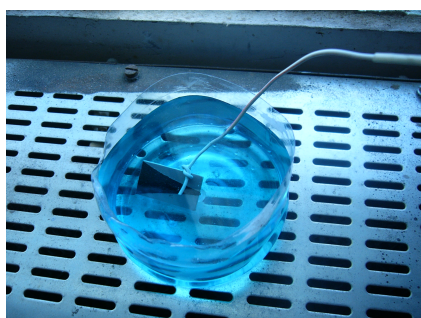


(b) Spirála

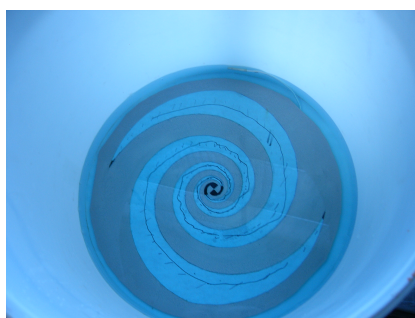
Obrázek 4.1: Příprava k leptání

První fáze výroby spočívala ve výběru vhodného postupu při leptání DPS. Nejprve byla vyzkoušena možnost využít leptuvzdorný lak, který by měl zabránit odleptání mědi pod nanesenou vrstvou laku. Úskalí tohoto postupu však spočívalo v tom, že kraje se mnohdy podleptaly, což by mohlo mít nepříznivý vliv na činnost antény.

Proto bylo rozhodnuto využít samolepícího papíru, na který byla vytištěna spirála a posléze se tento papír nalepil přímo na DPS. Následně bylo třeba s pomocí nože a křivítka přesně vyřezat tvar spirály tak, abych posléze mohl papír odlepit a na DPS zůstala přilepená pouze spirála. Papír společně s lepící vrstvou poměrně dobře zabraňuje podleptání, ačkoliv se může stát, že povrch mědi bude lehce poleptán.



(a) Balun



(b) Spirála

Obrázek 4.2: Leptání

Na konci je nutné nezakryté části DPS vyčistit technickým benzínem, neboť lepicí vrstva na nich může ulpět. U balunu se postupovalo obdobně. Pro ten je potřeba oboustranná DPS o rozměrech 26x15 mm.

Pro odleptání DPS byl použit persíran sodný, který by neměl být tak agresivní jako chlorid železitý. Namíchané a rozpuštěné krystalky ve vodě musí být zahřáté na teplotu 50 stupňů Celsia. Plošný spoj se poté vloží do leptací lázně na zhruba 15-25 minut dle množství plochy, která se má odleptat.



(a) Balun



(b) Spirála

Obrázek 4.3: Pájení

Po odleptání je možno pokračovat napájením SMA konektoru na nesymetrickou část balunu. S pomocí mikropáječky se pořádně nahřeje daný spoj a posléze je zalit cínem, aby spoj byl kvalitní. Na horní pásek se připájí vývod SMA konektoru, na dolní pak plášť SMA konektoru, kde bude připojení stínění. Na symetrické straně bylo nutné připájet vývody, kterými bude napájena anténa.



(a) Napájený balun



(b) Tubus s reflektorem s plíšky

Obrázek 4.4: Úpravy

Tubus s reflektorem byl zhotoven u klempíře o průměru 191 mm a výšce 32 mm. Reflektor byl přiletován zespodu k tubusu. Nutné však bylo zajistit podepření DPS se spirálou, aby se zajistila pevnost. Na okrajích se proto připájely čtyři plíšky z měděného plechu, kdy každý plíšek měl jednu polovinu vyšší. Po ohnutí plíšků v polovině do pra-

vého úhlu tak část zajišťovala podepření DPS, zatímco druhá, jenž vyčnívala nad DPS, mohla po ohnutí zajistit DPS z vrchu.

Do reflektoru byla pak uprostřed vyvrtána díra pro SMA konektor. Plášť konektoru byl připájen k reflektoru, čímž se zajistilo uzemnění. Samotný konektor společně s napájeným balunem bude podpírat spirálu uprostřed.

Nakonec se vyvrtaly do spirály dvě díry pro napájení antény na počátku obou ramen. Cuprexit se spirálou se poté vsadí do tubusu a zapájí se oba vývody. Posledním krokem bylo ohnout vyčnívající plíšky a zafixovat tak DPS se spirálou.



(a) Přední část



(b) Zadní část

Obrázek 4.5: Finální anténa

4.2 Ověření funkčnosti antény

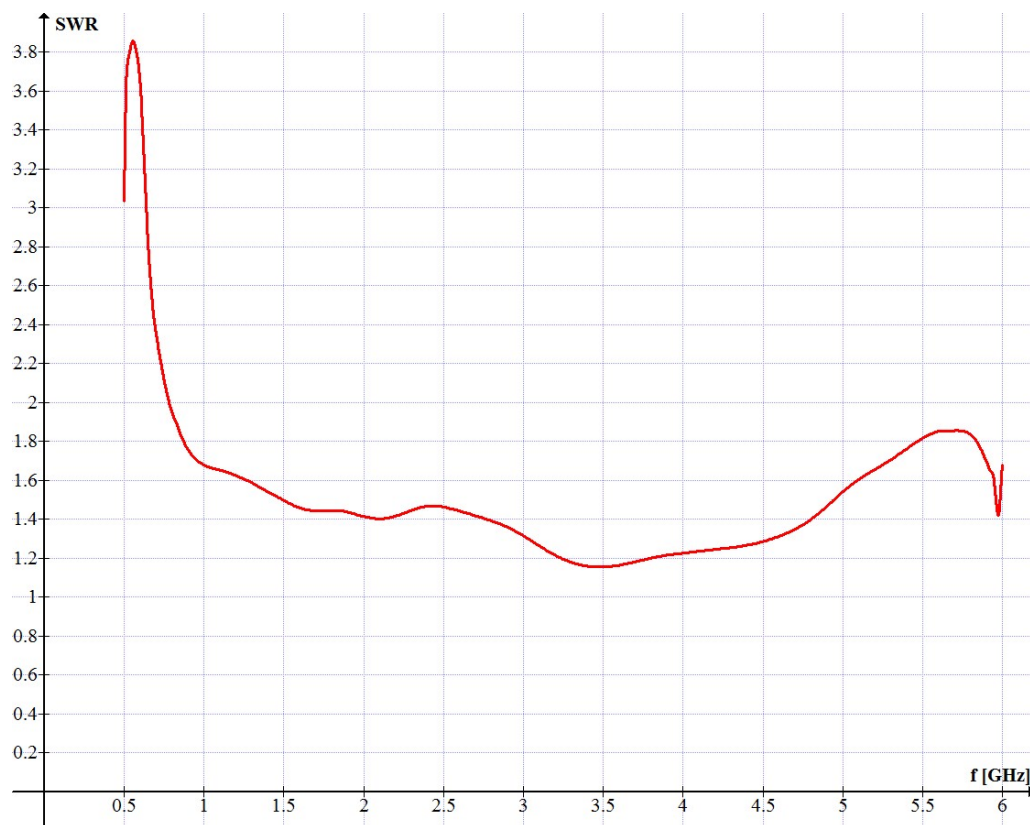
Posledním krokem bylo ověřit funkčnost antény a tím i její správnost. Měření proběhlo ve školní laboratoři. Ke změření parametrů byl použit vektorový analyzátor Anritsu MS2036C. Po kalibraci analyzátoru bylo prvním krokem změřit zpětný odraz. Na obrázku 4.6 níže vidíme, průběh, který při 800 MHz začíná na -9,95 dB a posléze klesá. Okolo 3,5 GHz dosahuje průběh -22,9 dB a poté opět roste. Na 6 GHz pak má S11 hodnotu -11,8 dB. Dále pak na frekvenci 2,4 GHz (ISM pásmo) dosahuje zpětný odraz -14,4 dB a na frekvenci 5,8 GHz 10,5 dB. Co se tvaru průběhu týče, je zde znát poměrně výrazný rozdíl od simulovaného grafu zpětného odrazu, neboť se zde neobjevuje kolísání na nižších kmitočtech a průběh poměrně plynule klesá. Navíc se podařilo dosáhnout hodnot nižších než -10 dB. Z toho vyplývá, že vyrobená spirálová anténa se chová lépe než v simulaci.



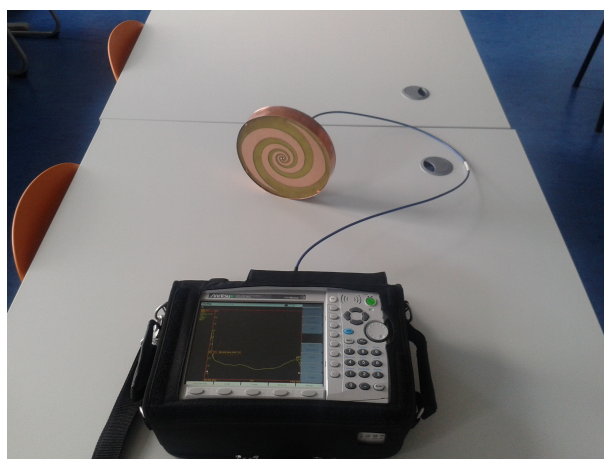
Obrázek 4.6: Graf zpětného odrazu - analyzátor

Na grafu 4.7 poměru stojatých vln je rovněž znát zlepšení. Průběh je plynulý, kolísání na nižších kmitočtech také chybí a celkový průběh nepřekročil v pracovním pásmu antény hodnotu 2:1. Při 800 MHz je hodnota nejvyšší a to 1,94:1 a na konci pásma při

6 GHz je pak hodnota 1,67 : 1. Po většinu pásma je PSV nižší než 1,5 : 1, jen pak okolo 5,8 GHz se hodnota opět vyšplhá výše a to na hodnotu 1,83 : 1.



Obrázek 4.7: Graf PSV - analyzátor



Obrázek 4.8: Ukázka měření

Poslední parametr zisk byl v ověřen substituční metodou na frekvenci 2,6 GHz, kde rozdíl mezi ziskem dipólu a spirálové antény činil 4 dB. Když se podíváme na graf odrazivosti 4.6, tak si můžeme povšimnout mírného nárůstu při frekvenci při 2,6 GHz, čili zisk víceméně odpovídá. Anténa však rezonuje na frekvenci 3,49 GHz, kde však nebylo možno anténu ověřit. Přesto je patrné, že zisk by zde byl mnohem lepší.

Dle výsledků z analyzátoru je vidět, že výsledná anténa má lepší vlastnosti než při simulaci, kdy na nižších kmitočtech byl průběh rozkmitaný. Důvodem lepších výsledků může být fakt, že při výrobě vznikla nepřesnost, kvůli které je vnější průměr o necelý milimetr větší.

5 Závěr

Jedním z cílů práce bylo přinést bližší pohled na problematiku spirálových antén. V teoretické části jsem postupně popsal základní vlastnosti, použití a funkci spirálové antény. Následně jsem ukázal možné typy spirál, které se používají ke konstrukci, a také jsem uvedl několik typů spirálových antén.

Hlavní náplň práce pak spočívala v praktické části, kde jsem vyhotovil návrh spirálové antény pro kmitočtové pásmo od 800 MHz do 6 GHz. Poté jsem si návrh ověřil v simulaci, kterou jsem postupně optimalizoval. Nakonec jsem anténu sestavil a ověřil jsem její správnost.

Samotná výroba spirálové antény není složitá. Není potřeba využít mnoho materiálu ke konstrukci. Jediným problémem u výroby se může vyskytnout při přenesení tvaru spirály z počítače na plochu cuprextitu. Pokud se neučiní správně, je možné, že bude spirála podleptaná a tím bude ovlivněna funkce antény.

Výsledná měření ukázala, že hodnota zpětného odrazu se pohybuje okolo -10 dB a níže. Poměr stojatých vln je také nízký. Anténa rezonuje na frekvenci 3,49 GHz. Vyrobená anténa by měla být schopna přijímat LTE, WiFi (většinu standardů), WiMax, případně ZigBee či Bluetooth a jiné.

Radek Fajkus

6 Reference

- [1] Dvorský Marek. *Základy bezdrátových komunikací pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*, 2014 [cit. 2015-11-22].
- [2] Beran Vlastimil. *Blízké pole dipólových antén* : [online]. Brno, 2010 [cit. 2015-11-22]. Diplomová práce z FEKT VUT, Vedoucí práce Zdeněk Nováček. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26794
- [3] ok1ufc. sidlo.com *Úvodní článek k vlastnostem krátkovlnných antén* [online]. 2001-2015 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://www.sidlo.com/ok1ufc/antenna_uvod.htm
- [4] Svoboda Pavel. Aeroweb.cz *Antény a magie kolem nich* [online]. 2008 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.aeroweb.cz/clanky/1231->
- [5] pira.cz *Všeobecně o anténách* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.pira.cz/antena.htm>
- [6] AUTOR NEUVEDEN. *microwavejournal.com* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.microwavejournal.com/ext/resources/images/Figures/2013/Jan/1M34/1M34F1x250.jpg>
- [7] AUTOR NEUVEDEN. *cs.wikipedia.org* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0%C3%AD%C5%99ka_p%C3%A1sma#/media/File:Bandwidth_2.svg
- [8] Autor neuveden *Vícepásmová anténa pro bezdrátovou počítačovou komunikaci*[online]. [cit. 2015-11-22]. Diplomová práce z VUT. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18940
- [9] Šrajbr, Michal *Šroubovicová dvoupásmová anténa pro WiFi pásmo* : [online]. Brno, 2012 [cit. 2015-11-22]. Diplomová práce z FEKT VUT, Vedoucí práce Kamil Pítra. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=51731
- [10] Sokol Vratislav, Vajtr Jiří, Hoffmann Karel. *vizualizace.elmag.org. Šroubovicová anténa* [online]. 2003-2015 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://vizualizace.elmag.org/FRVS_03_soubory/helix.htm
- [11] AUTOR NEUVEDEN. *readymaderc.com* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.readymaderc.com/store/images/HELIAXIAL12-01.jpg>
- [12] Antenna-Theory, *Spiral Antennas*: [online]. 2015 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.antenna-theory.com/antennas/travelling/spiral.php>
- [13] Placido de Vita *Antenna selection guidelines* [online]. 2012 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/jp/resource/technical/document/application_note/DM00068254.pdf

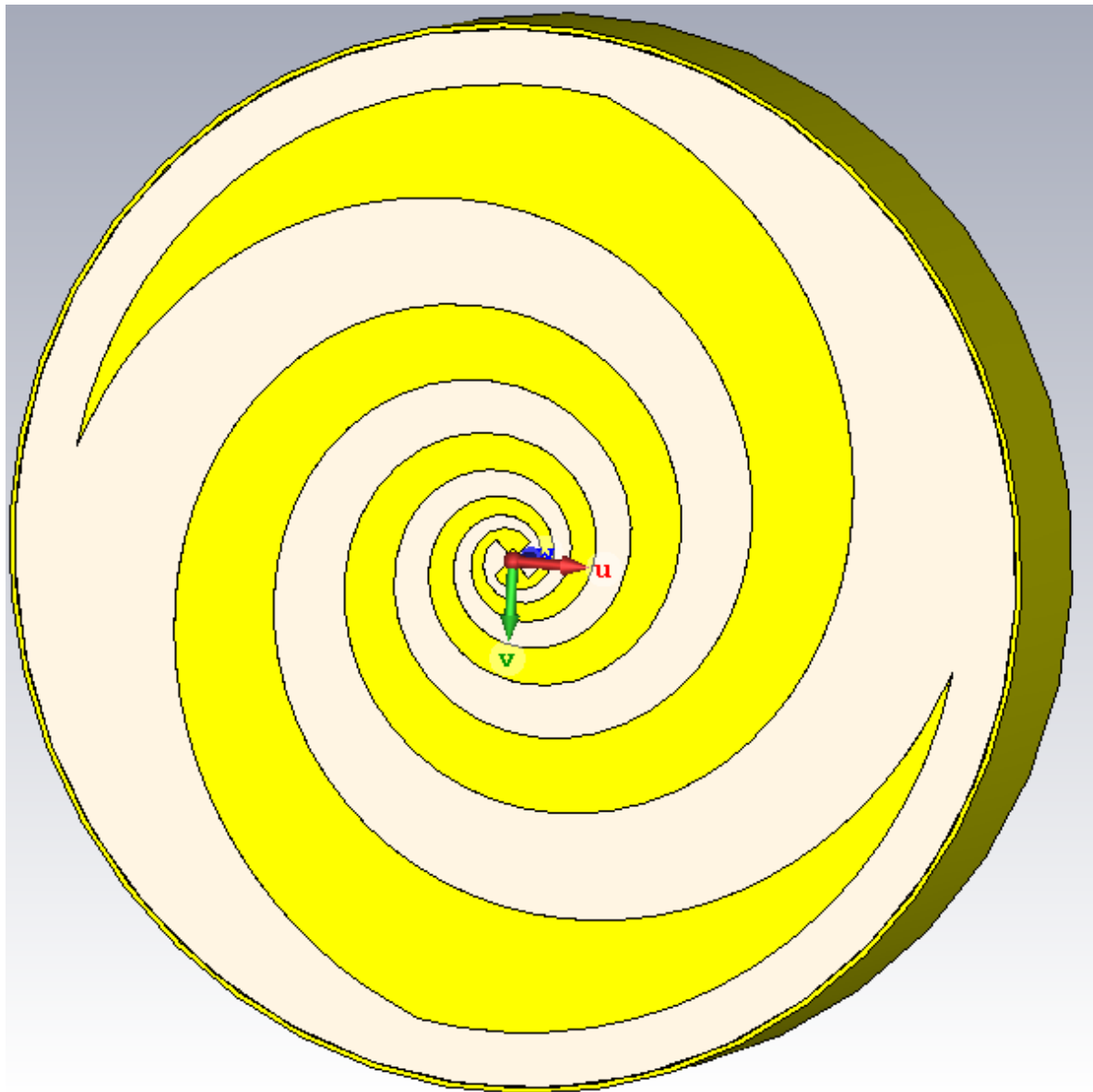
-
- [14] AUTOR NEUVEDEN. *kerma.co.uk* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.kerma.co.uk/images/spiral.jpg>
 - [15] AUTOR NEUVEDEN. *thumbs1.ebaystatic.com* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://thumbs1.ebaystatic.com/d/l225/m/mqAa-oGwlFJOgpy4GAU1lRw.jpg>
 - [16] Tišnovský Pavel. *root.cz Fraktály kolem nás* [online]. 2007 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.root.cz/clanky/fraktaly-kolem-nas/>
 - [17] Gupta Annie, Chavla Paras *Review On Fractal Antenna: Inspiration Through Nature* [online]. 2015 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://ijseas.com/volume1/v1i4/ijseas20150472.pdf>
 - [18] AUTOR NEUVEDEN. *m0wwa.co.uk* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://www.m0wwa.co.uk/mmedia/fractal_antenna/fractalantenna.jpg
 - [19] Raida Zbyněk *Logaritmicko-periodická anténa (LPA)* [online]. 2010 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/řaida/multimedia/index.php?nav=10-8-A>
 - [20] Macoun Jindra *Logaritmicko-periodické antény pro dvě pásma* [online]. 2014 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.crk.cz/FILES/VR-ANT/56.%20Logaritmicko-periodicke%20ant%C3%A9ny%20pro%20dv%C4%9B%20p%C3%A1sma.pdf>
 - [21] digizone.cz *anténa - logaritmicko-periodická* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.digizone.cz/slovnicek/antena-logaritmicko-periodicka/>
 - [22] AUTOR NEUVEDEN. *i.iinfo.cz* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://i.iinfo.cz/urs/logperi-123978698486876.JPG>
 - [23] Sulaiman H. A., Othman M. A., Othman M. F. I., Rahim Y. A., Pee N. C.. *Advanced Computer and Communication Engineering Technology: Proceedings of the 1st International Conference on Communication and Computer Engineering* :[online]. 2014 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=0rMjBQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>
 - [24] superkuh *Dodgy plans to make Archimedean spiral antenna for RTLSDR* : [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://superkuh.com/spiralantenna.html>
 - [25] John D. Dyson *A Survey of the Very Wide Band and Frequency Independent Antennas-1945 to the Present* : [online]. 1962 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/66d/jresv66dn1p1_a1b.pdf
 - [26] AntennaMagus *Self-complimentary Archimedean Spiral* : [online]. 2015 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://www.antennamagus.com/database/antennas/antenna_page.php?id=49

-
- [27] AUTOR NEUVEDEN. *antennamagus.com* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://www.antennamagus.com/database/antennas/50/Equiangular_spiral-antenna_design.png
 - [28] Balanis, Constantine A., *Antenna theory, analysis and design, 3rd Edition* New Jersey: John Wiley & Sons, 2005, ISBN 978-0-471-66782-7.
 - [29] AntennaMagus *Printed rectangular spiral* : [online]. 2015 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://www.antennamagus.com/database/antennas/antenna_page.php?id=52
 - [30] E.Cabot, J.Mosig *The square spiral antenna: benchmark for prefractal antenna performance*: [online]. 2002 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.tsc.upc.es/fractalcoms/downloads/Report%20-%20WP1%20T1.1%20EPFL%20T0+12%20Spiral%20small%20antenna.pdf>
 - [31] AUTOR NEUVEDEN. *antennamagus.com* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://www.antennamagus.com/database/antennas/84/Cavity-backed_self-complimentary_Archimedes_spiral-antenna_design.png
 - [32] AUTOR NEUVEDEN. *radiolab.pl* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://www.radiolab.pl/items/80_medium.jpg
 - [33] AUTOR NEUVEDEN. *hamuniverse.com* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.hamuniverse.com/40tak4.JPG>
 - [34] Yun-Taek Im, Jee-Hoon Lee, Rashid Ahmad Bhatti, Seong-Ook Park, *A Spiral-Dipole Antenna for MIMO Systems* [online]. 2008 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://ma.kaist.ac.kr/papers/85_A%20Spiral-Dipole%20Antenna%20for%20MIMO%20Systems.pdf
 - [35] KN9B *Spiral Dipole Antennas* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.kn9b.us/spiral-dipole>
 - [36] Elfmark, Zdeněk *Antény integrované do helmy*: [online]. Brno, 2013 [cit. 2015-11-22]. Diplomová práce z FEKT VUT, Vedoucí práce Kamil Pítra. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65817
 - [37] *microwaves&rf Spiral Antenna Cuts Low Profile To 9.4 GHz* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://mwrf.com/passive-components/spiral-antenna-cuts-low-profile-94-ghz>
 - [38] Haloda, Jiří *Širokopásmová sinusová anténa s dvojí polarizací*: [online]. Brno, 2011 [cit. 2015-11-22]. Diplomová práce z FEKT VUT, Vedoucí práce Kamil Pítra. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52587

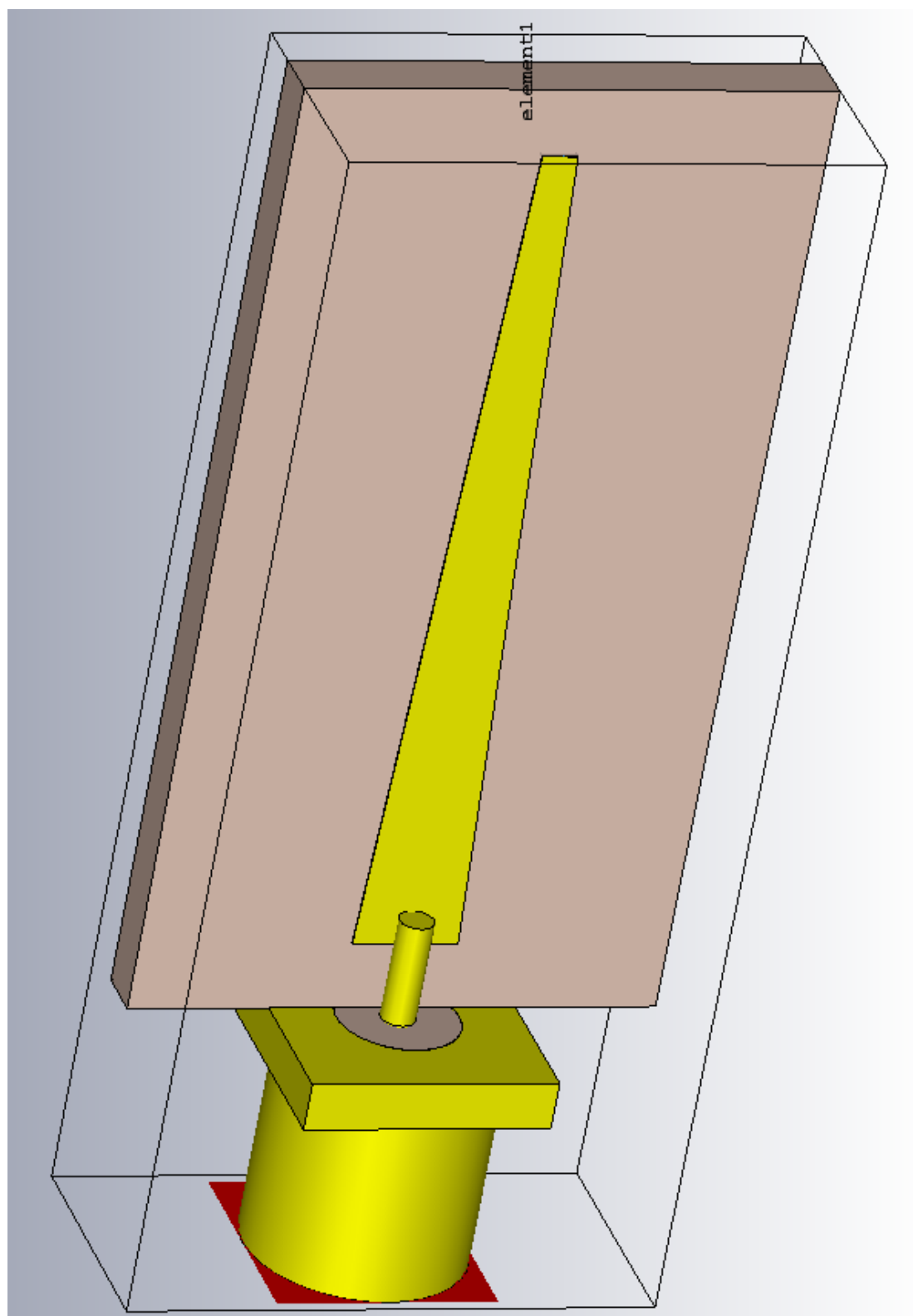
A Obsah elektronické přílohy

- Spiral_antenna_final.cst
- Spiral_antenna_AM_model.cst
- Balun.cst
- Spirala.dxf
- S11.csv
- PSV.csv
- cti_me.txt

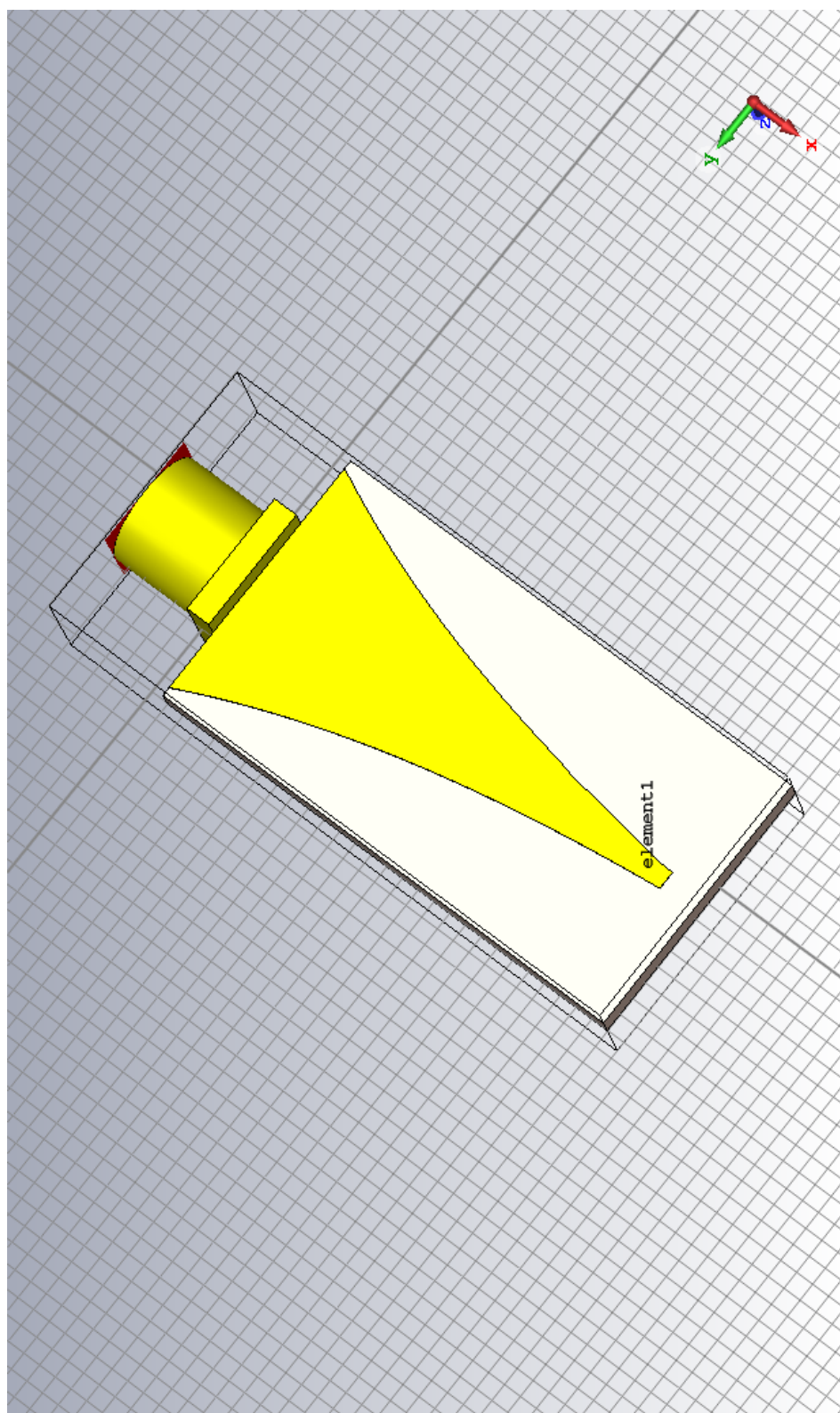
B Spirálová anténa - simulovaný model



Obrázek B.1: Spirálová anténa

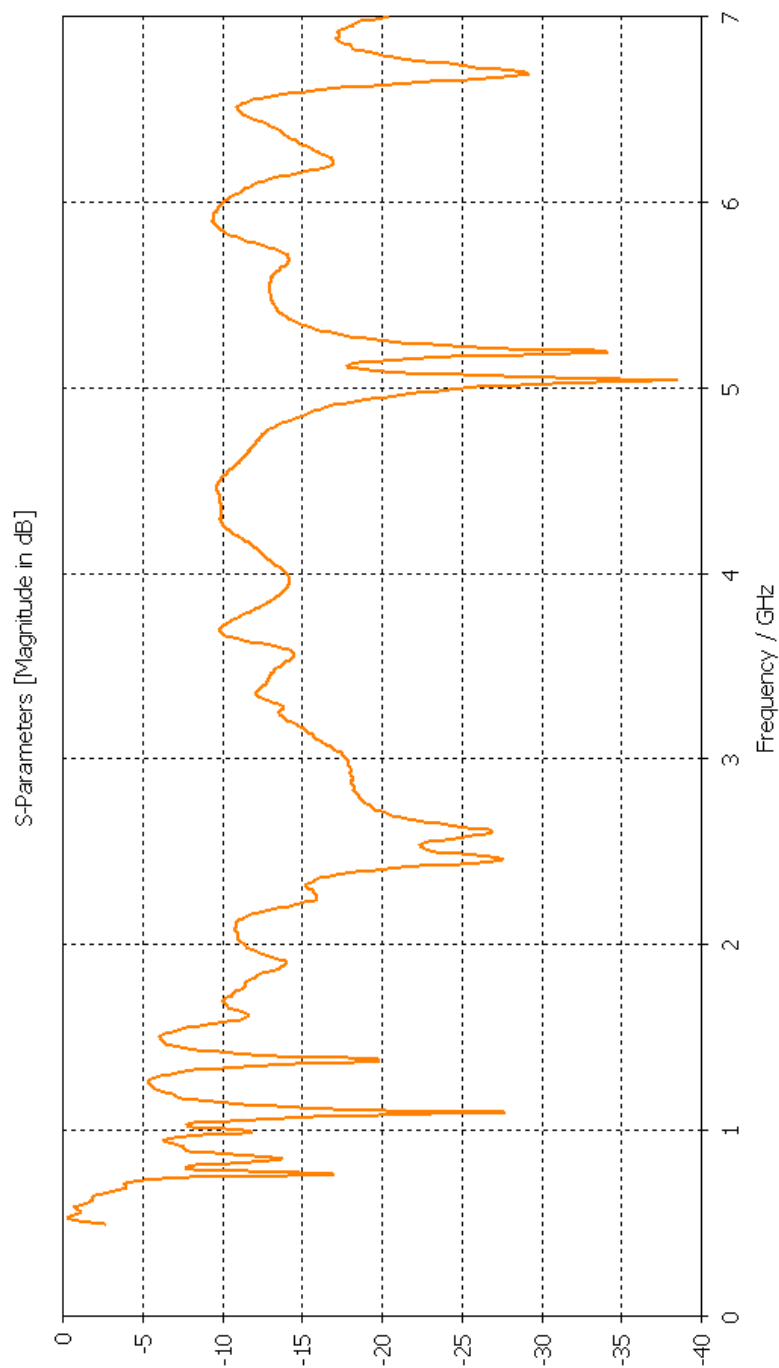


Obrázek B.2: Balun - přední strana

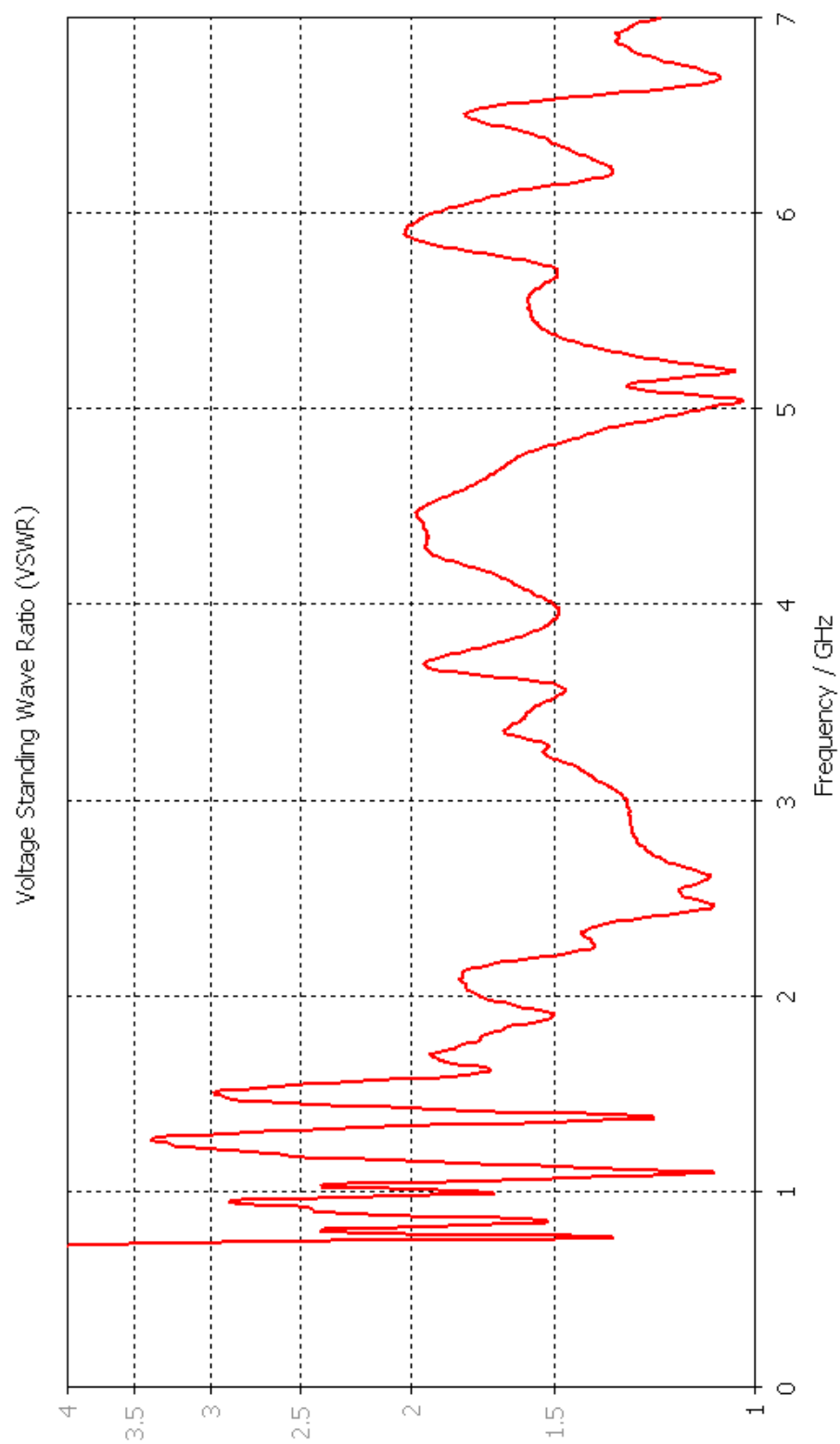


Obrázek B.3: Balun - zadní strana

C Spirálová anténa - simulace



Obrázek C.1: Graf zpětného odrazu - simulace

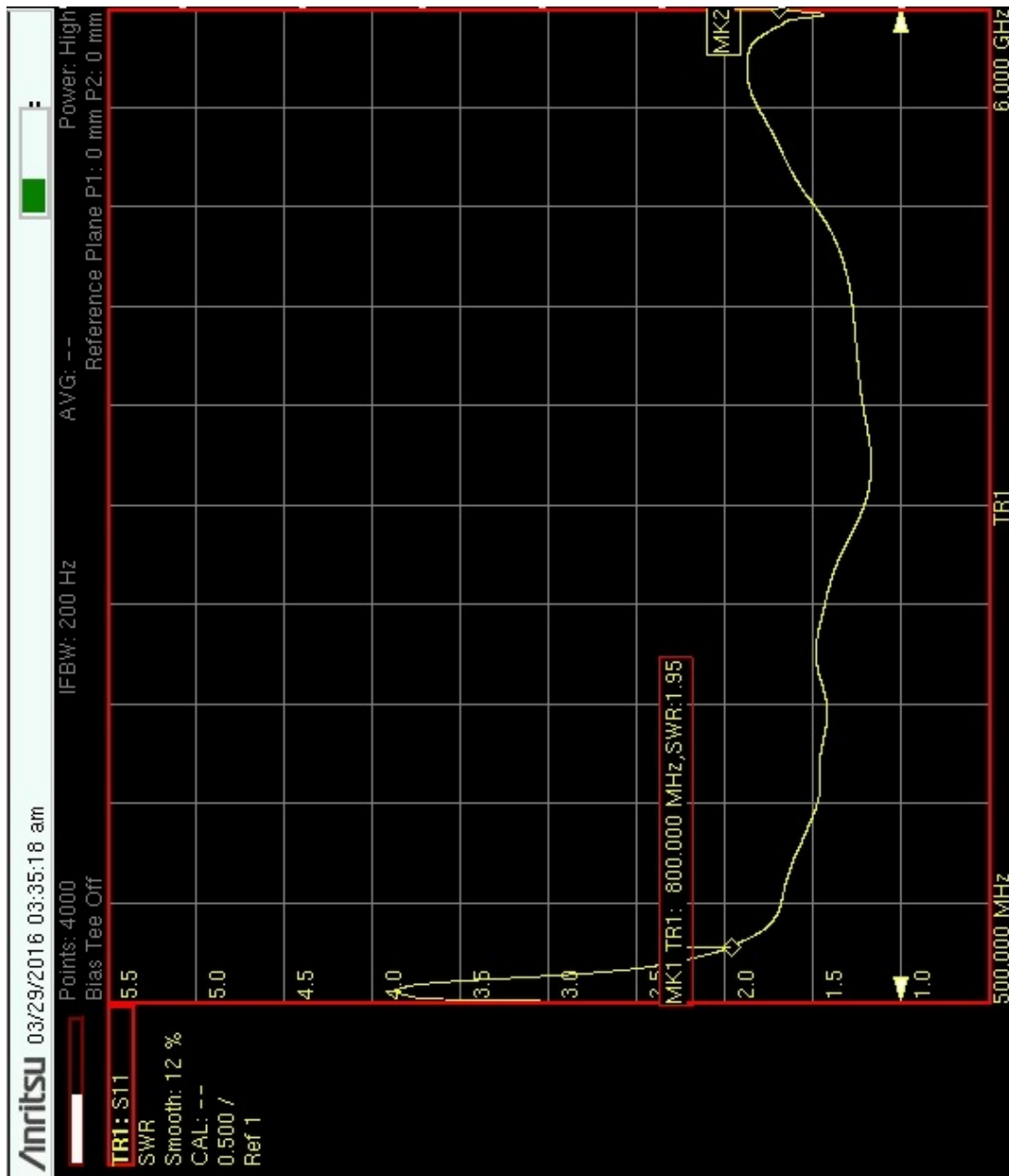


Obrázek C.2: Poměr stojatých vln PSV - simulace

D Spirálová anténa - výsledky měření

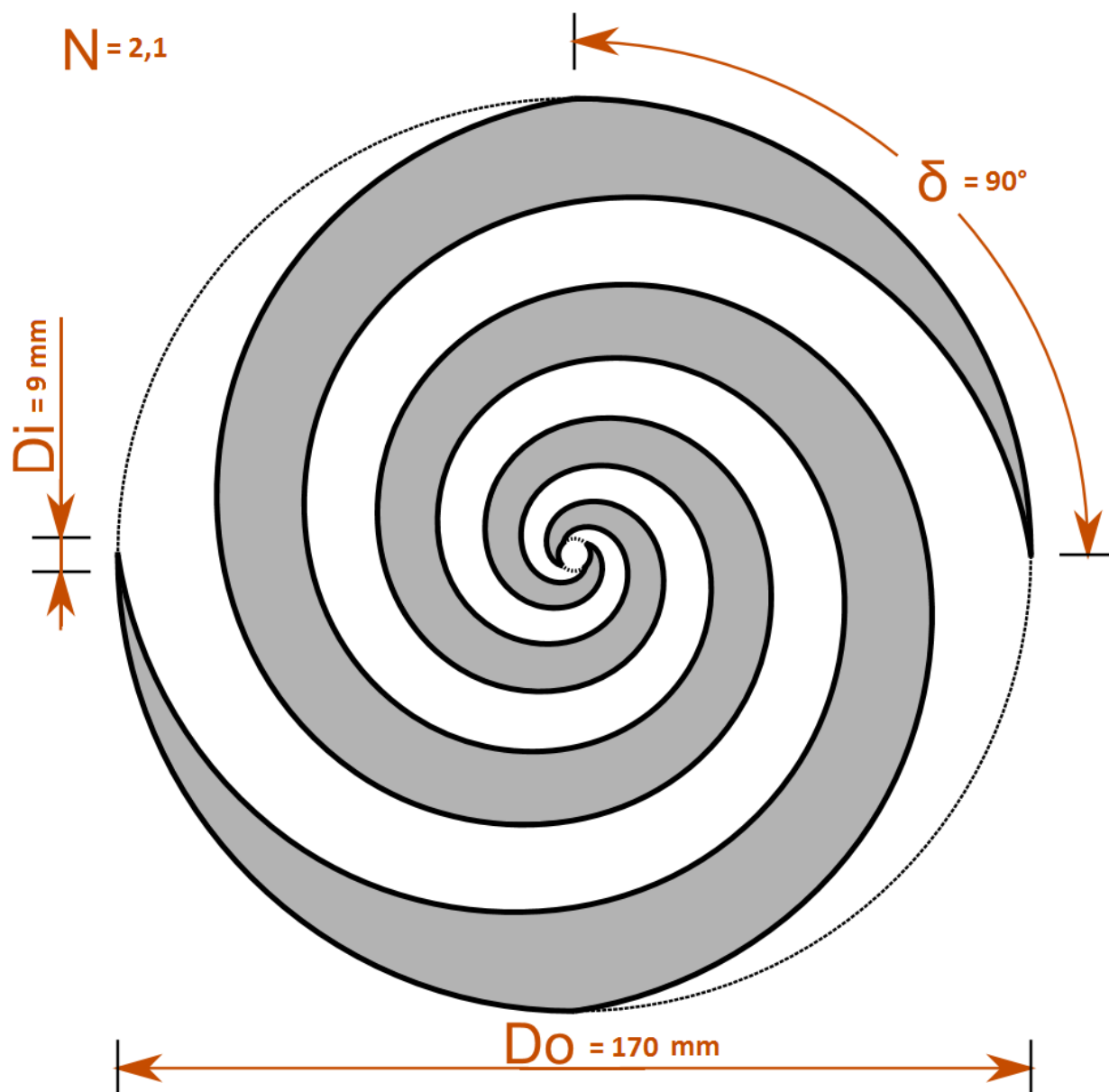


Obrázek D.1: Graf zpětného odrazu - měření

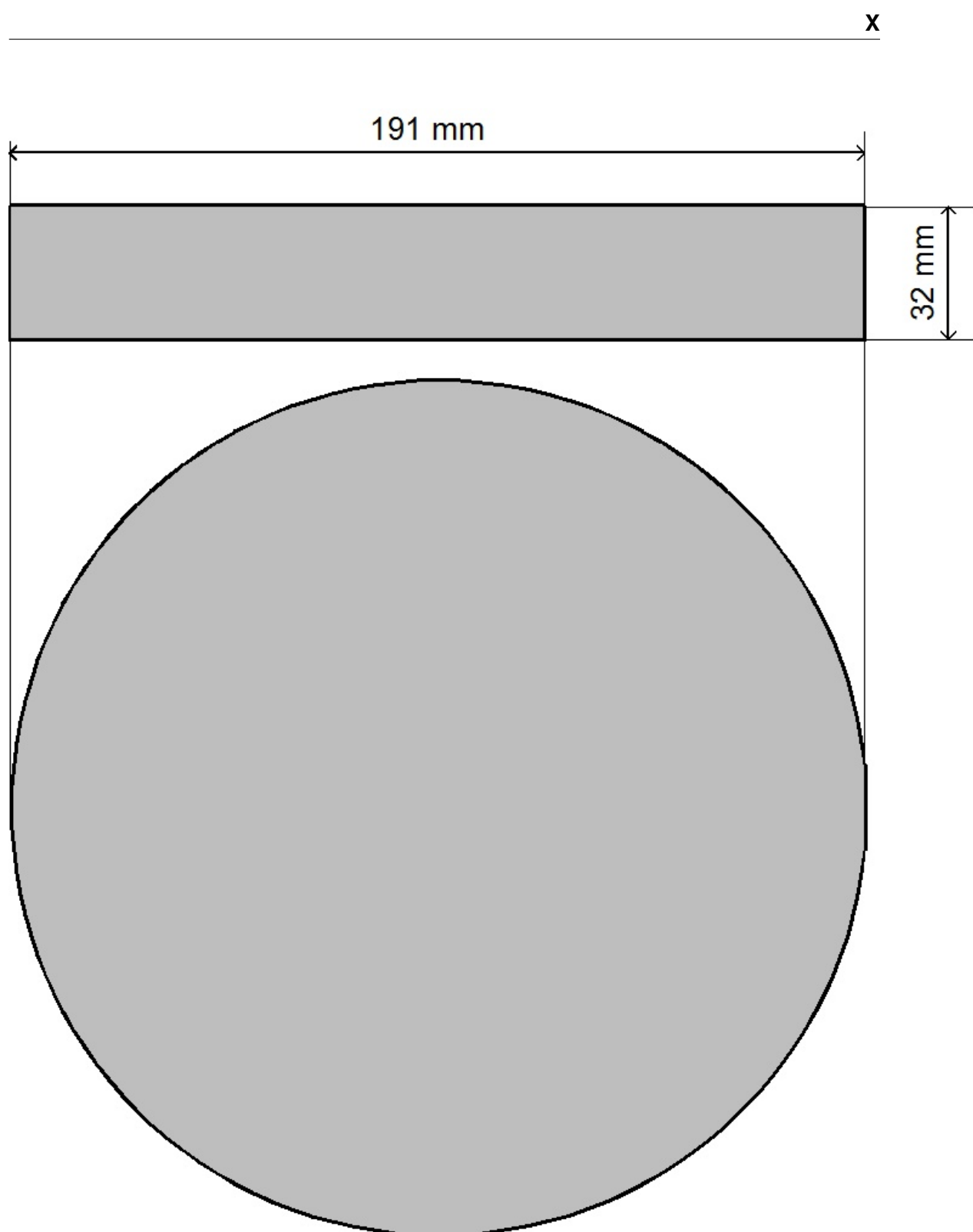


Obrázek D.2: Poměr stojatých vln PSV - měření

E Spirálová anténa - vyrobený model



Obrázek E.1: Okótovaná spirála



Obrázek E.2: Okótovaný návrh reflektoru a tubusu



Obrázek E.3: Spirálová anténa - přední strana



Obrázek E.4: Spirálová anténa - zadní strana